

ЗОНДИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Знание текущего и прогнозного состояния ионосферы, в первую очередь высотного распределения электронной концентрации, определяющей коэффициент преломления, чрезвычайно важно для решения многих научных и прикладных задач в области радиосвязи, радионавигации, радиовещания, а также транспортных, геодезических, геофизических, экологических и других проблем. В статье показана возможность получения профиля ионосферы Земли на основе двухчастотных радиоизмерений навигационных параметров космических аппаратов высокоточной навигационной системы типа «Навстар».

Известно, что одна из основных особенностей коротковолновых (КВ) радиолиний — ограничение рабочих частот со стороны как высоких, так и низких значений. Причем обе границы зависят от текущего распределения электронной концентрации ионосферы (ЭКИ) по высоте. Одним из основных мероприятий по улучшению работы КВ-радиолиний, в частности при ионосферных возмущениях, является оперативная смена частот. Благодаря наблюдениям за изменениями ионосферного профиля ЭКИ можно повысить точность и оперативность прогнозирования условий прохождения радиоволн в КВ-диапазоне. Это особенно важно для планирования сеансов дальней связи, составления расписания радиовещания, загоризонтного лоцирования, т.е. для решения задач распространения радиоволн, связанных с адаптацией радиосредств к меняющимся ионосферным условиям. Кроме того, наблюдение за динамикой изменения ряда параметров ЭКИ (высота максимальной концентрации, сама величина концентрации) позволяет повысить достоверность прогноза землетрясений, а использование динамической модели ионосферы повышает точность прогнозирования таких эффектов, как дополнительная задержка сигнала на трассах космических радиолиний, фарадеевское вращение плоскости поляризации, дисперсионный доплеровский сдвиг и ионосферная рефракция.

Определяющим фактором, влияющим на распространение радиоволн, в данном случае является высотное распределение коэффициента преломления ионосферы. Прогнозные расчеты состояния ионосферы для различных гелиогеофизических условий довольно сложны. Они представляют инте-

рес лишь в том случае, если удастся получить практически осуществимую программу оценки параметров ионосферы, учитывающую всю сложность процессов, связанных с ее образованием, и дающую приемлемую точность. Введение в действие высокоточных спутниковых навигационных систем "Глонасс" (Россия) и "Навстар" (США) открыло уникальную возможность для получения сведений о высотном распределении ЭКИ в подорбитальном пространстве орбиты космического аппарата (КА) в различных геофизических условиях в глобальном масштабе. Предпосылкой для реализации такой возможности является работа спутниковой аппаратуры этих систем на двух частотах f_1 и f_2 [1,2].

Результаты численного моделирования распространения радиоволн на модели ионосферы, определяемой ГОСТом 25645.142-86 [3] и предназначенной для спутниковых систем радионавигации, показали [2], что разработанный метод в основном ориентирован на определение высотного распределения ЭКИ со среднеквадратической погрешностью около 10% от значения концентрации ионосферы в максимуме. Реализация метода, физической основой которого является наличие двухчастотных измерений и общепринятой для данного региона эмпирической модели ионосферы, уменьшает потребность в станциях ионосферного зондирования.

В системах траекторных измерений КА трасса распространения радиосигнала проходит через атмосферу Земли. Ее влияние проявляется в ослаблении сигнала, изменении скорости его распространения, изменении длины его траектории и т.п. Так как для измерения параметров сигнала используются фазовые методы, то последующий анализ и исследования проводятся от-

носительно погрешности измерения временной задержки либо соответствующих им параметров движения КА — дальности или разности дальности.

Степень влияния атмосферы Земли на точность траекторных измерений зависит от преломляющих свойств атмосферы, расположения траектории КА относительно пункта наблюдения и принципов проведения траекторных измерений. Требуемая точность измерений может быть достигнута только при всестороннем анализе возможных ошибок измерений, один из основных источников которых — влияние атмосферы Земли.

Эффективное устранение ошибок измерений возможно лишь в том случае, если известны функциональные зависимости измеряемых параметров от факторов, непосредственно влияющих на точность измерений. Одна из таких функциональных связей — зависимость измеряемой дальности от атмосферных параметров, точнее, высотного профиля коэффициента преломления атмосферы, приводящая к изменению с высотой над земной поверхностью скорости распространения электромагнитных волн. Поэтому ясно, что повышения точности определения параметров движения КА невозможно добиться без учета влияния атмосферы, которая в первую очередь воздействует на точность радиотехнических измерений. Это приводит к необходимости разработки алгоритмов расчета влияния рефракции атмосферы и создания методик ее учета с точностью, удовлетворяющей требованиям спутниковых систем.

В основе аналитического описания параметров радиосигналов, принимаемых от КА, лежит геометрооптическое решение задачи о распространении УКВ в неоднородной сферически-слоистой атмосфере:

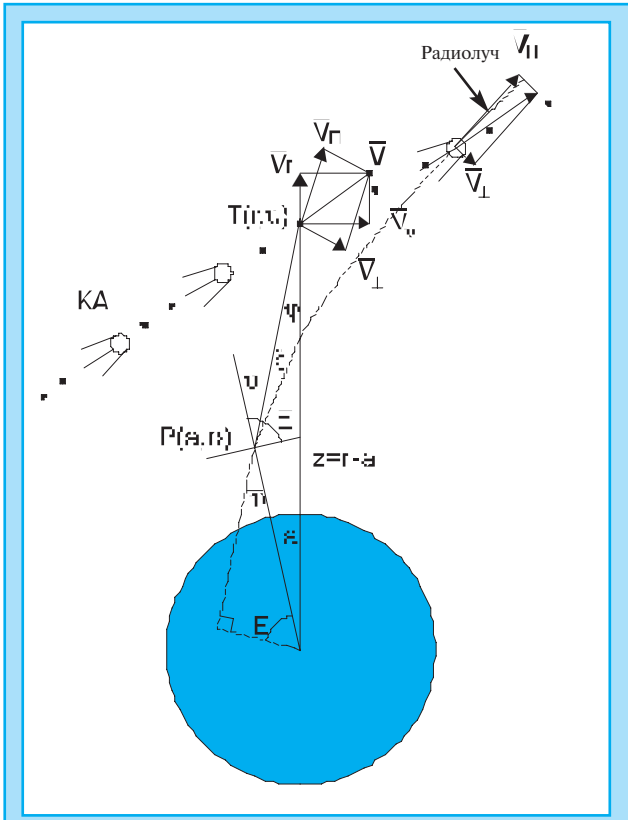


Рис.1. Геометрия задачи

длина пути радиоволн в вакууме (выбирается из семейства (S) при $n \equiv 1$), т.е. искомое расстояние "точка наблюдения – КА", $\Delta R_e \equiv \Delta R_T + \Delta R_I(\omega_i)$, ΔR_T – вариации R из-за рефракционного изменения длины траектории радиоволн в атмосфере ΔR_e , тропосфере ΔR_T и ионосфере ΔR_I , соответственно.

Двухчастотный метод коррекции ионосферы основан на обратнопропорциональной зависимости коэффициента преломления ионосферы от частоты. Учитывая, что КА излучают радиосигналы на двух частотах ω_1 и ω_2 , в точке наблюдения имеем:

$$\psi(\omega_2) = R + \Delta R_T + \Delta R_I(\omega_1), \quad (5)$$

$$\psi(\omega_1) = R + \Delta R_T + \Delta R_I(\omega_2). \quad (6)$$

Вычитая из (5) (6) (обычно $\omega_2 > \omega_1$), в приемнике можно сформировать разность фаз двух радиоволн. Тогда на выходе соответствующего блока имеем значение измеряемой радиотехническим методом разности дальности до КА на двух частотах:

$$\psi(\omega_2) - \psi(\omega_1) = \Delta R_I(\omega_2) - \Delta R_I(\omega_1). \quad (7)$$

В соответствии с [4] и геометрией задачи (рис.1) измеряемая дальность от пункта наблюдения до КА определяется соотношением:

$$R(\vartheta) = \int_a^H \frac{n^2(r) r dr}{n^2(r) r^2 - n^2(R) a^2 \sin^2 \vartheta^{1/2}}, \quad (8)$$

где H – высота КА, ϑ – зенитный угол,

a – радиус Земли в месте расположения измерительного пункта, $n(r)$ – высотная зависимость коэффициента преломления атмосферы.

Данное интегральное уравнение является основным выражением для анализа связи коэффициента преломления атмосферы с рефракционными ошибками, возникающими при проведении радиотехнических измерений.

Для сферически-слоистой модели атмосферы и $[n(r) - 1] \ll 1$ рефракционный вклад атмосферы при измерениях дальности определяется выражением:

$$\Delta R(\vartheta) = \int_a^H \frac{[n(r) - 1] r dr}{[r^2 - a^2 \sin^2 \vartheta]^{1/2}}, \quad (9)$$

Приведенное выражение в результате сделанных предположений и упрощений является приближенным и ограниченным. Диапазон его применения по зенитному углу наблюдения ϑ определяется требуемой точностью введения поправок.

Учитывая дисперсионные свойства ионосферы, изменение длины пути распространения радиоволн на высоких частотах $f \geq 30-100$ МГц за счет ионосферы можно представить в виде [4]:

$$\Delta R_I(\vartheta, f) = - \frac{4.04 \cdot 10^7}{L} \int_L N_z dl, \quad (10)$$

где dl – элемент пути L распространения радиоволн в ионосфере, $N(z)$ – распределение электронной концентрации, f – частота сигнала.

Выполняя измерения на двух частотах и формируя разность измерений дальностей согласно формуле (7), можно получить данные для левой части выражения, связывающего распределение ЭКИ с измеренной разностью дальностей [2]:

$$\Delta R_I(\vartheta, f) = 4.04 \cdot 10^7 \frac{k^2 - 1}{k^2 f^2} \frac{\int_{z_1}^{z_2} N(z) z_1 \cdot (a+z) dz}{[(a+z)^2 - a^2 \sin^2 \vartheta]^{1/2}}, \quad (11)$$

$$\vec{E}(\vec{r}, t, \omega_i) = E_0(\vec{r}) \exp\{-j[\omega_i t - K_i \psi(\omega_i, \vec{r})]\}, \quad i=1,2, \quad (1)$$

где $\Phi = -\omega_i t + K_i \psi(\omega_i, \vec{r})$ – фаза сигнала; c – скорость света в вакууме; $K_i = \omega_i / c$; $\omega = 2 \pi f$; f – частота сигнала.

Такая форма искомого решения уравнения Максвелла выбрана, чтобы продемонстрировать двухчастотный метод коррекции ионосферной рефракции. Прямая задача рефракции радиоволн сводится к решению уравнения эйконала (ψ – эйконал или электрическая длина пути):

$$\nabla \psi[\vec{r}, \omega]^2 = n^2(r, \omega). \quad (2)$$

Для сферически-слоистой модели атмосферы коэффициент преломления n зависит только от высоты $z = r - a$ над земной поверхностью (a – радиус Земли). В этом случае интегрирование уравнения (2) сводится к простому одномерному случаю: $d\psi/dz = n(z, \omega)$. (3) Отсюда следует, что

$$\psi(\omega_i) = \int_{(s)} n(\omega_i, \vec{r}) dS \equiv R_e(\omega_i) = R + \Delta R_T + \Delta R_I(\omega_i). \quad (4)$$

Здесь ψ можно рассматривать как функционал, заданный на семействе (S) лучевых траекторий. Обозначение R_e подчеркивает размерность ψ как длину пути радиоволн в атмосфере (электрическую длину в смысле умножения элемента геометрической длины dS на локальное значение $n(z): dR_e = n(z) a S$). Далее R – геометрическая

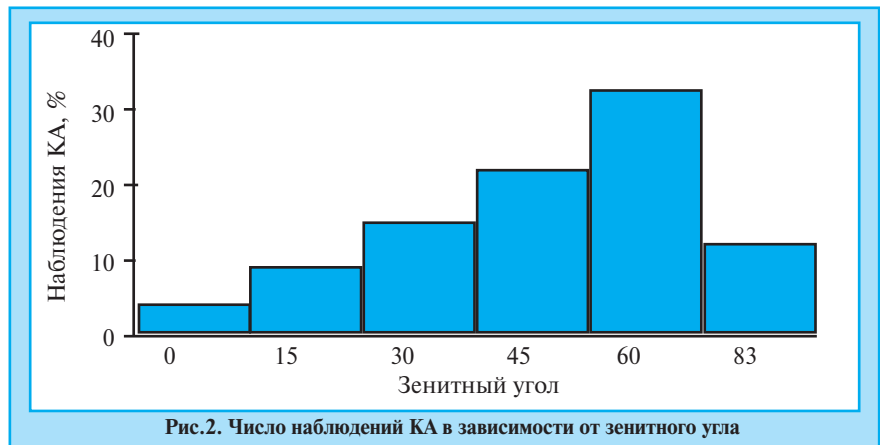


Рис.2. Число наблюдений КА в зависимости от зенитного угла

где $N(z)$ – высотное распределение ЭКИ, ϑ – зенитный угол наблюдения космического аппарата, z_1 и z_2 – нижняя и верхняя границы ионосферы, $k=f_2/f_1$ – отношение частот.

Формула (11) справедлива для зенитных углов наблюдения ϑ , удовлетворяющих условию распространения радиоволн через ионосферу $\cos^2 \vartheta > 8,08 \cdot 10^7 N_{max}/f^2 [4]$, где N_{max} – значение максимальной ЭКИ. Учитывая, что радионавигационные спутниковые системы "Глонавс" и "Навстар" работают в диапазоне частот $f=1,2-1,6$ ГГц и зенитных углах, как правило меньше 85° , данное условие для спутниковых систем навигации не накладывает каких-либо ограничений на применение формулы (11). Это означает, что предложенный в [2] метод можно применять для любого спутника, находящегося в зоне видимости станции измерений.

Современные высокоточные измерения параметров радиосигналов КА позволяют использовать получаемые радиоданные для оперативного определения физических характеристик атмосферы, необходимых для прогнозирования реальных условий распространения радиоволн, особенно при больших зенитных углах.

При наземных измерениях параметров радиосигналов исходные формулы (10) и (11) определяют основные рефракционные эффекты при работе измерительных систем и создают основу для разработки алгоритмов, программ и методик определения высотного профиля коэффициента преломления атмосферы $n(r)$ по результатам радиотехнических измерений параметров сигналов КА.

С математической точки зрения выражение (11) является интегральным уравнением первого рода типа Фредгольма, решение которого относительно неизвестной функции представляет собой некорректно поставленную задачу. Подробно алгоритм решения задачи изложен в [2]. Здесь же кратко рассмотрим основные моменты его реализации.

Представим (11) в общем виде:

$$V(\vartheta) = \int_a^r N(r) A(r, \vartheta) dr, \quad (12)$$

где $N(r) = n(r) - 1$; $A(r, \vartheta)$ – ядро интегрального оператора;

$$A(r, \vartheta) = 4,04 \cdot 10^7 \frac{(k^2 - 1)r}{\dots}$$

Решение уравнения (12) сводится к поиску такой функции $N(r)$,

при которой выполняется неравенство:

$$\left| \int_a^H V(\vartheta) - \int_0^r N(r) A(r, \vartheta) dr \right| \leq \delta \quad (13)$$

В такой постановке рассматриваемая задача эффективно решается методом регуляризации Тихонова. Она сводится к минимизации сглаживающего функционала Тихонова

$$T^\alpha [N_\alpha(r), V(\vartheta)] = \int [N_\alpha(r) A(r, \vartheta) dr - V(\vartheta)]^2 d\vartheta + \alpha F[N_\alpha(r)], \quad (14)$$

где $\alpha > 0$ – параметр регуляризации, $F[N_\alpha(r)] > 0$ – стабилизирующий оператор, $N_\alpha(r)$ – функция, удовлетворяющая условию (13) при заданном значении параметра регуляризации.

Результаты численного моделирования показали, что предложенный алгоритм обеспечивает восстановление высотного ЭКИ с точностью не хуже 10% от ее значения в максимуме слоя F_2 . Определение профиля атмосферы с такой точностью позволяет практически полностью устранить влияние ионосферы на радиотехнические измерения.

При реализации алгоритма обращения левая часть уравнения (11) $\Delta R(\vartheta, f)$ должна быть представлена в виде двумерного массива – разности дальностей и зенитного угла наблюдения ϑ :

$$\Delta R(\vartheta, f) = \begin{vmatrix} \Delta R(\vartheta_1, f) & \vartheta_1 \\ \Delta R(\vartheta_2, f) & \vartheta_2 \\ \dots & \dots \\ \Delta R(\vartheta_n, f) & \vartheta_n \end{vmatrix}.$$

Размерность массива по столбцу определяет максимальное разрешение восстановленного профиля электронного распределения ионосферы по высоте.

Результаты численного моделирования [2] показали, что точность определения высотного распределения ЭКИ практически не зависит от выбранного диапазона зенитных углов наблюдения. Однако оптимальным с точки зрения точностных параметров, характеризующих данный метод, является диапазон зенитных углов наблюдения $\vartheta = 40-80^\circ$. В соответствии с проведенными расчетами (рис.2) данному диапазону углов соответ-

ствует и максимальное число наблюдаемых спутников и, соответственно, количество измерений, если их проводить из точек, равномерно расположенных по земному шару на сетке значений $20^\circ \times 20^\circ$. Как показали расчеты, в диапазоне зенитных углов наблюдения $\vartheta=40-80^\circ$ осуществляется более 75% всех проводимых измерений. Это позволяет определять профиль ионосферы практически в реальном масштабе времени.

Оперативное определение профиля ЭКИ $N(z)$ дает возможность по текущим радиотехническим измерениям эффективно устранять мешающую при высокоточных измерениях параметров движения КА ионосферную задержку в регионах, для которых характерны значительные ионосферные изменения. Так, например, в системе "Навстар", используя 15-секундные временные интервалы измерений, для определения профиля ионосферы $N(z)$ достаточно примерно 15–20 измерений разности дальностей, что соответствует пяти минутам работы регистрирующей аппаратуры. Следует заметить, что дискретность измерений не оказывает существенного влияния на возможность определения высотного профиля ЭКИ.

Для зенитных углов наблюдения $\vartheta \leq 85^\circ$ проекция траектории радиоволн в максимуме ЭКИ (подионосферная точка) может быть удалена от пункта измерения на расстояние до 1500 км. Зависимость от зенитного угла наблюдения удаления подионосферной точки представлена в таблице, из данных которой видно, что проекция всей существенной для распространения радиоволн ионосферной области на поверхность Земли может находиться на расстоянии до 2900 км от пункта измерений. Таким образом,

Зависимость расстояния подионосферной точки от зенитного угла наблюдения

Зенитный угол, град.	Верхняя граница, км	Максимум ионосферы, км	Нижняя граница, км
0.	0.	0.	0.
10	152.1	50.5	10.6
20	311.9	104.	21.7
30	488.7	164.2	34.3
40	694.9	236.8	49.7
50	949.4	331.3	70.4
60	1282.8	467.0	101.6
70	1744.4	686.9	158.0
80	2408.1	1096.5	297.8
85	2842.8	1438.5	476.4

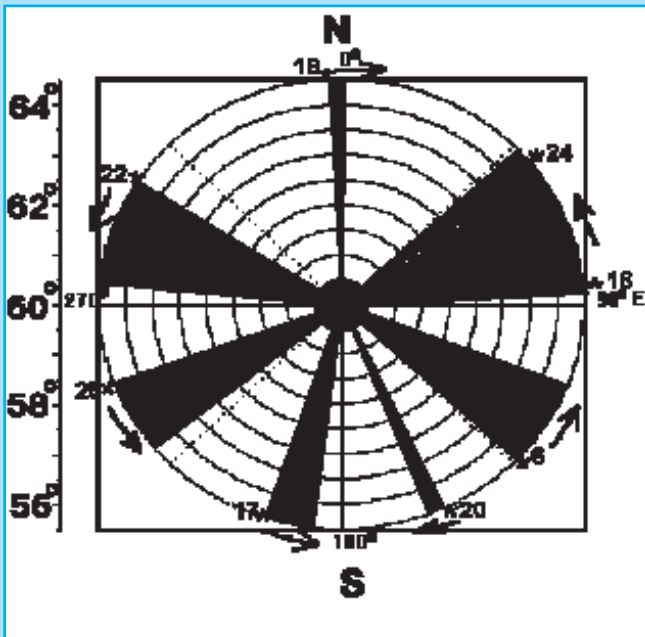


Рис.3. Зоны видимости КА при проведении измерений

на позиционные измерения в спутниковых навигационных системах оказывают влияние области ионосферы, удаленные от пункта измерений вплоть до 2900 км. На таких расстояниях может сказаться горизонтальная неоднородность ионосферы, зависящая от азимута. Учитывая баллистическое размещение КА системы "Глонасс" и "Навстар", в зоне видимости пункта измерений должно находиться не менее четырех спутников. Это позволяет определять профиль ионосферы для разных азимутальных направлений.

Практическая возможность определения высотного распределения ЭКИ была реализована на экспериментальных данных, полученных во время работы 12-канального геодезического приемника 4000 SSE фирмы TRIMBLE NAVIGATION, работающего по КА системы "Навстар". Измерения проводились 16 июня 1994г. в районе Санкт-Петербурга (60° N, 30° E) с 14 час 18 мин до 15 час 40 мин местного времени. Этот район соответствует субавроральной ионосфере. Одновременно в зоне видимости пункта измерений находились шесть КА системы "Навстар". Геометрическое расположение КА представлено на рис.3.

Цифры на окружности указывают номер спутника, стрелки – направление движения КА. Из рис.3 видно, что в данном сеансе измерений спутники расположены во всех четырех квадрантах, что позволяет получить сведения об ионосфере с различных

азимутальных направлений. Диапазон же зенитных углов наблюдения КА захватывает область ионосферы, удаленную от пункта измерения до 1500 км. Это дает возможность получить данные об ионосфере в районе 55–65° северной широты и 25–35° восточной долготы, который включает в себя область главного ионосферного провала (от 55 до 65° геомагнитной широты) и является переходной областью от средних широт к высоким. В

этой области важны как горизонтальные, так и вертикальные электромагнитные дрейфы [5].

Непрерывное наблюдение КА позволяет практически в реальном масштабе времени осуществлять мониторинг ионосферы. Данные о профиле электронного распределения ионосферы Земли можно получать через 3–5 минут с начала наблюдений. Начало выдачи данных зависит от дискретности измерений, так как для определения высотного профиля ионосферы необходимо иметь не менее 15–20 измерений разности дальностей. Это означает, что если дискретность измерений составляет 15 сек (как это было при проведении измерений), первые данные об ионосфере Земли можно получить через 3,5 минуты. Уменьшение количества точек измерений, с одной стороны, нецелесообразно из-за того, что дискретность отсчетов значений высотного распределения ЭКИ зависит именно от количества измерений. С другой стороны, определять профиль ионосферы целесообразно на интервалах времени не более 20 мин. При таких интервалах наблюдений широта проекции макси-

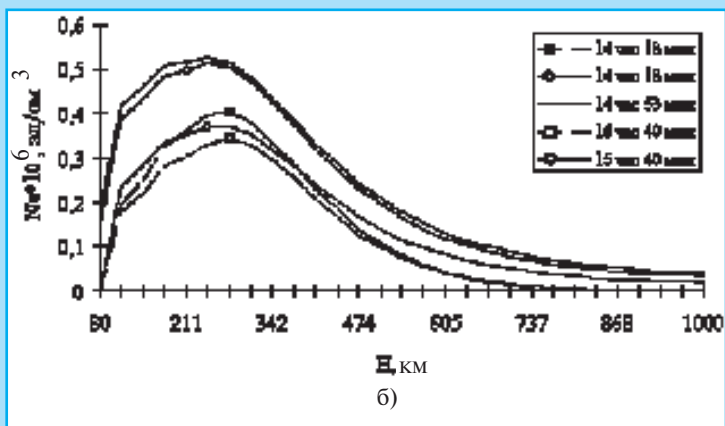
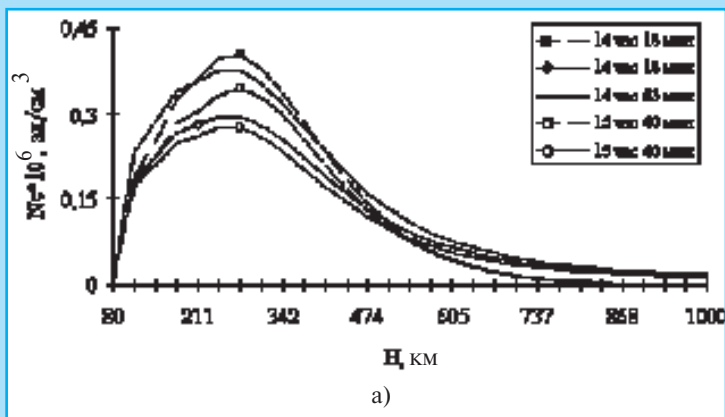


Рис.4. Профили электронной концентрации: сплошная линия – восстановленные, пунктир – модель (ГОСТ 25645.142-86)

мума ионосферы изменяется не выше чем на 2° , а максимальный градиент электронной концентрации составляет не выше 10% [5]. Исходя из этих ограничений, определение высотного распределения ЭКИ проводилось на 5–20-минутных интервалах. Такое усреднение соответствовало 20–80 отсчетам измерений разности дальностей. Это позволяло определять распределение ЭКИ с дискретностью от 50 до 12,5 км по высоте.

Результаты определения высотного распределения ЭКИ на основе измерений разности дальностей в диапазоне зенитных углов наблюдения $\vartheta=59-21^{\circ}$ и $\vartheta=9-45^{\circ}$ соответственно представлены на рис. 4а,б. Высотные профили (сплошная линия) получены при наблюдении спутников 17 и 6 для моментов времени $t_1=14$ час 18 мин, $t_2=14$ час 53 мин, $t_3=15$ час 40 мин. Пунктиром изображена модель ионосферы [3]. Результаты измерений разности дальностей на частотах $f_1=1,2276$ ГГц и $f_2=1,5754$ ГГц показаны на рис. 5а,б. Данные получены с помощью регистрирующей аппаратуры, работающей на двух частотах. Здесь же представлены результаты расчета разности даль-

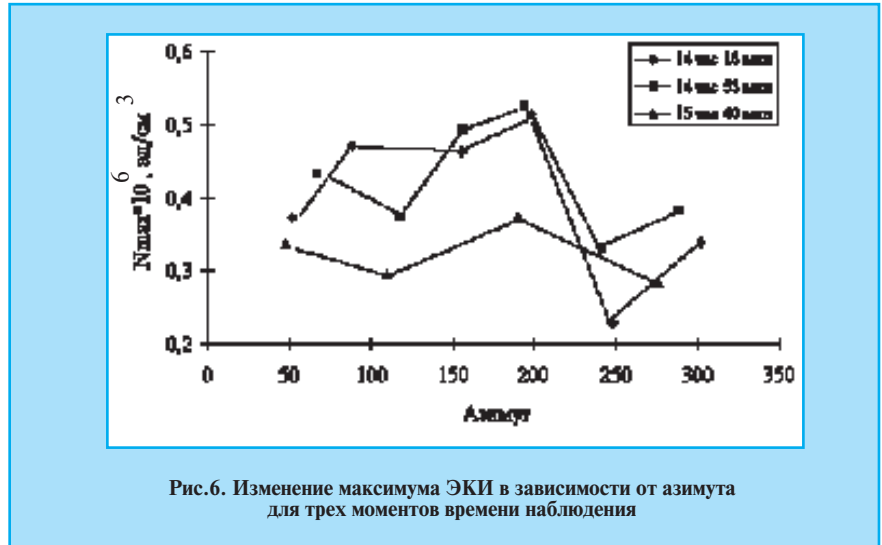


Рис.6. Изменение максимума ЭКИ в зависимости от азимута для трех моментов времени наблюдения

ностей для модели ионосферы (пунктир) [3] и профиля ионосферы (сплошная линия), восстановленного из данных измерений.

Из рис.4 видно, что максимальное значение ЭКИ достигается при $t_2=14$ час 53 мин и составляет $F_{2max} = 5,26 \cdot 10^5$ эл/см³ для спутника 17, наблюдаемого при зенитных углах $59^{\circ} > \vartheta > 21^{\circ}$ и азимуте $A = 198-188^{\circ}$. Тот же параметр для модели ионосферы составля-

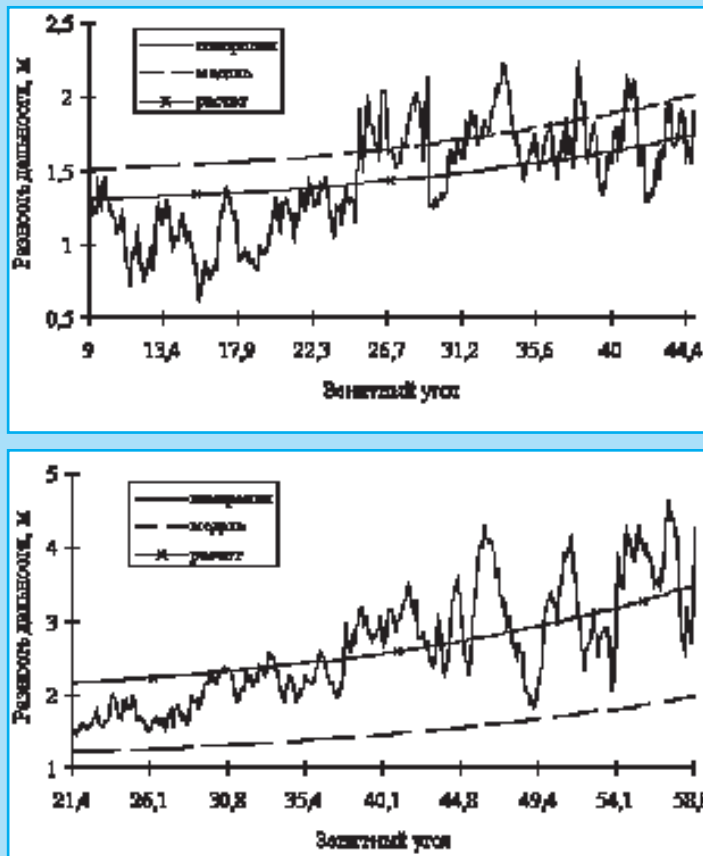
ет $F_{2max} = 4,04 \cdot 10^5$ эл/см³ при $t_1=14$ час 18 мин.

Азимут спутников 17 и 6 за время измерений изменился на 12 и 26° соответственно. Проекция максимума ионосферы, через который проходил радиолуч, была удалена от пункта измерения на расстояние не более 500 и 250 км, которому соответствует максимальное изменение широты (долготы) подионосферной точки не более 4° .

Анализ данных измерений и восстановленных по ним профилей ЭКИ показал, что предложенный метод позволяет проследить как временную, так и азимутальную зависимость электронного распределения ионосферы Земли. Определить временную зависимость электронного содержания ионосферы в данном сеансе можно было для спутника 24, данные измерений с которого не содержали заметной азимутальной зависимости.

КА 24 наблюдался в течение 25 минут в диапазоне зенитных углов $\vartheta = 70-80^{\circ}$, что позволило получить 100 измерений разности дальностей. Азимут спутника за это время не изменялся ($A=52^{\circ}$). Учитывая, что проведенное ранее численное моделирование показало независимость определения профиля от зенитного угла наблюдения, можно считать, что изменение профиля электронного содержания ионосферы Земли обусловлено временным изменением состояния ионосферы. Естественно, данный вывод относится только к наблюдениям, полученным с одного спутника. Измерения для остальных спутников имели заметную азимутальную зависимость (рис.6).

Представленные значения соответствуют максимальным значениям



б)

Рис.5. Значения разности дальностей для спутников 6 (а) и 17 (б)

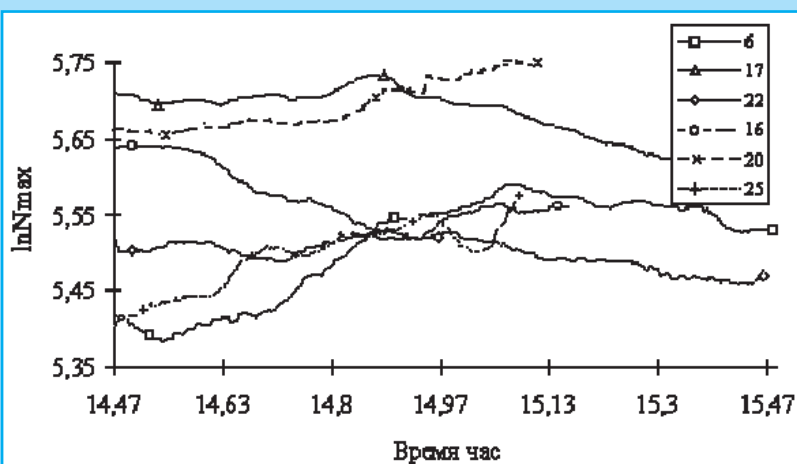


Рис.7. Азимутально-временная зависимость максимума ЭКИ для шести спутников

ЭКИ для шести спутников. Все они получены для времени наблюдения $t=14$ час 53 мин. Для сравнения здесь же приведены значения максимума ЭКИ, соответствующие по времени началу и концу временного интервала измерений: $t=14$ час 18 мин и $t=15$ час 40 мин. Полученные экспериментальные данные позволили установить азимутально-временную зависимость изменения максимума ЭКИ (рис.7).

Направление изменения азимута показано на рис.3 стрелками. Характер изменения азимута дает возможность проследить широтно-временную зависимость максимума ЭКИ. Так, например, для спутников 17 и 20, имеющих близкие азимутальные и зенитные диапазоны углов наблюдений, характер изменения максимума ЭКИ практически одинаков вплоть до 15 часов местного времени. Дальнейшее уменьшение значения максимума связано, возможно, с влиянием главного ионосферного провала. Такое же уменьшение максимума наблюдается и для спутника 6 при зенитных углах наблюдения $\vartheta < 35^\circ$. Это соответствует удалению проекции максимума ионосферы от пункта наблюдения примерно на 200 км, или, учитывая азимутальные изменения, на $1-2^\circ$ широты. Недостаток эксперимен-

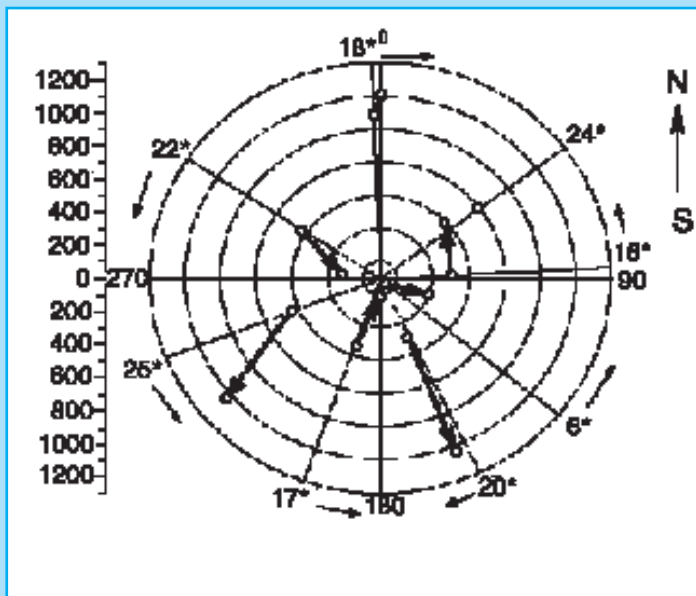


Рис.8. Направление изменения проекции максимума подионосферной точки

тальных данных, к сожалению, не позволяет однозначно подтвердить предположение об изменении максимума ЭКИ в районе $58-59^\circ$ широты, так как пять остальных спутников наблюдались при зенитных углах $\vartheta > 40^\circ$. Это соответствовало широтам более 60° и менее 58° .

Направление изменения проекции максимума ионосферной точки показано на рис.8 стрелками. Из рисунка видно, что спутник 17 приближается к пункту наблюдения, а 6 – удаляется. Данные рис.8 объясняют также поведение максимума ионосферы и для других спутников. Так, спутники 17 и 20 имеют примерно одинаковое азимутальное направление. В начале сеанса они расположены ближе к области среднеширотной ионосферы и имеют более высокие, по сравнению с остальными наблюдениями, значения максимума ионосферы. Приближением к среднеширотной ионосфере можно объяснить и увеличение максимума ионосферы, наблюдаемое по данным спутника 25. Существенное уменьшение максимума ионосферы по наблюдениям спутника 16 обусловлено, по-видимому, переходом в область полярной ионосферы. Направление изменения проекции максимума ионосферы имеет для него явную широтную зависи-

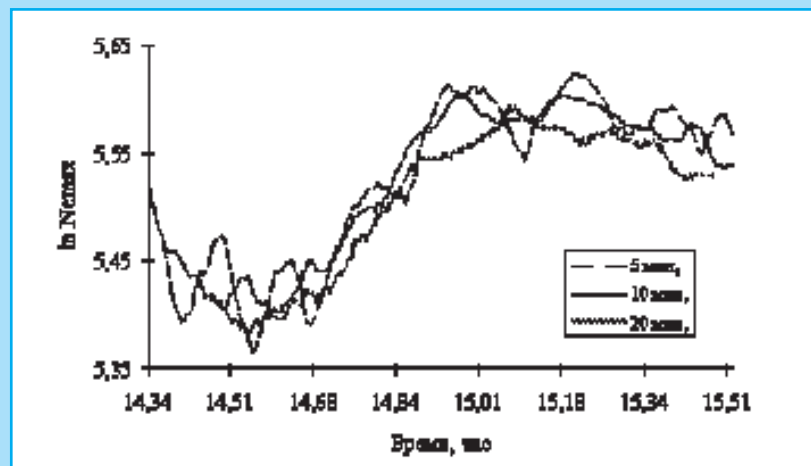


Рис.9. Изменение максимума ЭКИ в зависимости от времени усреднения по наблюдениям КА 6

мость. Поведение максимума ионосферы, полученного по наблюдениям спутника 22, в целом соответствует характеру изменения направления проекции максимума ионосферной точки.

Результаты исследований показали также, что максимальное значение высотного профиля ЭКИ можно определять и по пятиминутным наблюдениям. В данном случае это соответствовало 20 измерениям разности дальностей. Таким образом, метод позволяет проследить практически мгновенные изменения максимума ЭКИ. В качестве примера на рис.9 приведены значения максимума ЭКИ, полученные по 5-, 10- и 20-минутным интервалам наблюдений.

В целом характер поведения максимума сохраняется для всех интервалов. Большая амплитуда вариаций для пятиминутного интервала отражает, в основном, характер данных измерений разности дальностей. Если предположить, что значение разности дальностей обусловлено только влиянием ионосферы, данные, приведенные на рис.9 для пятиминутных интервалов, должны представлять собой мгновенные изменения максимума ЭКИ.

Итак, анализ высотных профилей распределения ЭКИ, полученных на основании реальных данных измерений радиосигналов спутниковой радионавигационной системы, показал, что разработанный метод дает возможность по двухчастотным измерениям разности дальностей проследить как временную, так и азимутальную зависимость электронного распределения ионосферы Земли без использования наземных ионосферных станций зондирования. В принципе, ионосферные станции необходимы для калибровки, но число их можно значительно сократить. Данный метод позволяет получить распределение электронного содержания ионосферы Земли в радиусе до 1500 км от пункта наблюдения и прогнозировать условия распространения радиоволн в ионосфере Земли в реальном масштабе времени. Он может быть реализован в спутниковой системе, работающей на двух отдельных частотах в диапазоне, в котором заметно влияние ионосферы. Результаты применения метода подтвердили устойчивость его работы и реальную возможность определения высотного профиля электронного распределения

ионосферы Земли. Причем профиль ионосферы можно определять по любому спутнику независимо от характера его движения. Это еще раз указывает на то, что при наличии специального математического обеспечения спутниковые системы, работающие на двух частотах, могут стать эффективным инструментом для исследования ионосферы Земли.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ivanov N., Salishev V. Status, Plans and Policy of the GLONASS for Civil Applications. – Proceedings of Conference GPS - 91, 1991.*
2. *Андреанов В.А., Смирнов В.М. – Радиотехника и электроника, 1993, т. 38, №7, с. 1326.*
3. *Ионосфера Земли. Модели распределения электронной концентрации. ГОСТ 25645. 140-86-ГОСТ 25645. 142-86.*
4. *Колосов М.А., Арманд Н.А., Яковлев О.И. Распространение радиоволн при космической связи. М.: Радио и связь, 1969.*
5. *Иванов-Холодный Г.С., Михайлов А.В. Прогнозирование состояния ионосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1980.*

Представляем авторов статьи

Андреанов Владимир Андреевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник. В 1962 году окончил физический факультет Ленинградского государственного университета. Автор свыше 100 научных статей. В настоящее время заведующий лабораторией Института радиотехники и электроники РАН. Область научных интересов — распространение радиоволн и космические исследования.

Арманд Неон Александрович, доктор технических наук, профессор. В 1954 году окончил физический факультет Московского государственного университета. Дважды лауреат Государственной премии СССР (1974, 1983гг.). Заслуженный деятель науки и техники РФ. Автор свыше 200 научных статей, соавтор трех монографий. В настоящее время заместитель директора Института радиотехники и электроники РАН. Область научных интересов — высокочастотная электродинамика, распространение радиоволн, космические исследования.

Мосин Евгений Леонидович, кандидат технических наук, член-корреспондент Международной академии информатизации. В 1977 году окончил факультет электроники и счетно-решающей техники Московского лесотехнического института, в 1989 году – Военную академию им. Ф.Э. Дзержинского. Автор свыше 90 научных трудов и пяти изобретений в области космонавтики. Область научных интересов — космические исследования, в частности, решение прикладных задач с использованием спутниковых навигационных систем.

Смирнов Владимир Михайлович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник. В 1980 году окончил Московский физико-технический институт. Автор свыше 20 научных статей. В настоящее время – старший научный сотрудник Института радиотехники и электроники РАН. Область научных интересов — распространение радиоволн, космические исследования.

**Новая
исследовательская
организация
в области
средств
подвижной
связи**

Дайджест

Восемнадцать фирм (в том числе Nokia, Fujitsu, Lucent Technologies, Matsushita, Motorola, NEC, Nortel, Philips Research, Sony и Texas Instruments) и пять университетов Великобритании (Бристольский, Бредфордский, Сурей и Страткланда, а также Королевский колледж Лондонского университета) организовали консорциум, задача которого — изучение работы развертываемых в стране беспроводных систем связи между подвижными объектами. Консорциум будет поддерживать долгосрочные исследования, направленные на реализацию предложенной Международным телекоммуникационным Союзом универсальной мобильной телекоммуникационной системы (UMTS), участвовать в программах выработки и продвижения стандартов на них. Эта инициатива должна способствовать унификации исследовательских работ, проводимых в пяти университетах, и обеспечить обратную связь с промышленностью.

Партнерами образована фирма Mobile and Personal Communications и Центр высокого качества. Определены четыре основных направления работ: услуги и критерии услуг; сети, обеспечивающие требуемую ширину полосы для выполнения комплексной (мультимедийной) обработки; изучение возможности создания реконфигурируемых терминалов с тем, чтобы с одного терминала можно было получить доступ к многочисленным системам различных стандартов; среда распространения ВЧ сигнала в контексте проблем, связанных с работой по различным стандартам на передающие среды в и вне помещения.

Центр высокого качества в своей деятельности будет опираться на Технологический прогноз, отражающий сильные и слабые стороны средств связи между подвижными объектами. Прогноз подготовлен на базе проведенных в Великобритании в 1994—1995 годах правительственных слушаний по средствам связи, которые показали, что страна занимает прочное положение в этом секторе мирового рынка, но пока не предпринимает ощутимых усилий по унификации разработок различных школ.

Electronic Engineering Times, 1996, N929, p.8

Доклады, представленные на 42-й Международной конференции по электронным приборам (IEDM), крупнейшем ежегодном форуме полупроводниковых фирм, обозначили проблемы, стоящие перед промышленностью при переходе от 0,35-мкм к 0,1-мкм и менее технологии. По утверждению представителя фирмы IBM, к 2004 году можно ожидать появления КМОП процесса, позволяющего формировать структуры, работающие при напряжении 1 В, с линиями шириной 0,1 мкм и длиной затвора 0,07 мкм. Однако для этого необходимо решить проблемы, связанные с субмикронной литографией, снижением плотности рассеиваемой мощности, уменьшением задержки сигнала в соединительных линиях и случайных сбоях в работе, а также с масштабированием порогового напряжения.

По утверждению участников конференции, проблема субмикронной литографии решается достаточно успешно. Исследователи фирмы IBM описали 0,25-мкм процесс изготовления ячейки статического ДОЗУ площадью всего 6,9 мкм². Подобные ячейки планируется использовать во встроенной в процессор PowerPC, кэш памяти емкостью 512 Кбит, работающий на частоте 500 МГц. С помощью метода глубокой УФ (193 нм) литографии изготовлена экспериментальная схема емкостью 1 Мбит с временем выборки 6,4 нс, работающая при напряжении 1,8 В. В ней использованы вольфрамовые межсоединения.

Фирма Mitsubishi Electric, несмотря на свою приверженность рентгенолитографии, сообщила о возможности формирования с помощью литографии на базе лазера на фториде криптона и шаблонов со сдвигом фазы окон диаметром 0,12 мкм с высокой плотностью размещения. Технология перспективна для изготовления схем ДОЗУ емкостью в несколько гигабит.

Другие японские фирмы, в частности Toshiba и NTT, не отказались от рентгенографии и с помощью этого метода создали ячейку памяти самой малой на сегодняшний день площади — 0,1152 мкм².

Проблема, связанная с большой плотностью рассеиваемой мощности (если не принять мер, в ближайшее время величина рассеиваемой мощности может достичь 200 Вт вследствие увеличения плотности размещения элементов и рабочей частоты), решается двумя способами. Первый — формирование критических проводящих дорожек, обеспечивающих высокую скорость передачи сигнала, и нахождение способов отвода выделяемого тепла. Второй — несколько поступиться потенциальным быстродействием, присущим 0,1-мкм устройствам, чтобы достичь лучшего управления рассеиваемой мощностью. Оба метода требуют серьезного совершенствования средств моделирования.

Для решения проблемы задержки сигнала в межсоединениях ведется интенсивный поиск новых структур металлизации. Чтобы не допустить ситуации, когда на задержку сигнала в межсоединениях приходится значительная доля времени цикла, по мнению Девари, в верхних слоях металлизации следует формировать более широкие соединительные линии.

Заметных успехов в разработке новой системы металлизации достигли специалисты фирмы NEC. Ими разработана многослойная технология, предусматривающая применение в качестве изолирующего слоя фторированного аморфного углерода с высокой диэлектрической постоянной, осаждаемого поверх диоксида кремния и позволяющего значительно снизить паразитную емкость разводки в сравнении с структурами с одним слоем диоксида кремния. Кроме того, между новым диэлектриком и оксидом кремния разработчики осаждали промежуточный слой алмазоподобного углерода (некристаллический углерод, содержащий в своей структуре кристаллы алмаза). В результате время задержки опытной ИС удалось сократить в два раза. Фирма планирует использовать новую технологию для изготовления второго поколения схем RISC процессоров с минимальной шириной линий 0,25 мкм. NEC также работает над созданием медных соединительных линий, наносимых на кристалл без слоя барьерного металла, выполняющего функции совмещения. Однако при использовании материалов с высокой проводимостью разработчики сталкиваются с проблемой перекрестных искажений из-за высокой плотности монтажа.

С уменьшением размеров элементов и рабочего напряжения ИС снижается и пороговое напряжение МОП транзисторов. При этом растет ток утечки. Сокращение разности между рабочим и пороговым напряжениями приводит к увеличению отношения сигнал/шум, ухудшая надежность схемы. Эта проблема решается уменьшением эффекта короткого канала (снижение порогового напряжения по мере уменьшения эффективной длины канала). Важно также объединять методы проектирования схемотехники, архитектуры и конструкции. Например, ради увеличения быстродействия критической секции схемы разработчик может пойти на увеличение ее тока утечки и снижение отношения сигнал/шум. В этом случае появляется необходимость изготавливать на кристалле приборы с различными или даже динамически регулируемые с помощью напряжения смещения пластины значениями порогового напряжения.

Electronic Engineering Times, 1996, N931, p. 1, 136

**Конференция
IEDM
нацеливает
промышленность
на освоение
0,1-мкм
технологии**

Дайджест