

УДК 621.396.67

Крупноапертурный излучатель для многолучевой антенны системы спутниковой связи.

Пономарев Л.В., Вечтомов В.А., Милосердов А.С.

Аннотация

Проведена оптимизация крупноапертурного излучателя; приведены результаты численного расчета КУ в зависимости от параметров излучателя; определено минимальное количество облучателей в излучателе для обеспечения требуемого сектора обзора; приведена зависимость минимального количества лучей, от требуемого КУ МАР.

Ключевые слова:

спутниковая связь; антенная решётка; крупноапертурный излучатель; коэффициент усиления; сектор обзора.

Двухзеркальные антенны в системах спутниковой связи

Бортовые антенны, применяемые на космических аппаратах, базирующихся на геостационарной орбите (ГСО) должны иметь высокий (до 45...60 дБ) коэффициент усиления (КУ) с целью широкополосного доступа к мультисервисным услугам систем спутниковой связи (ССС). Это приводит к тому, что бортовые антенны космических аппаратов (КА) имеют большие размеры апертур и остронаправленные лучи. Однако, эти же антенны должны обслуживать с КА на ГСО глобальную или региональные зоны. Эта задача решается с использованием многолучевых антенн (МЛА).

Таковыми антеннами оснащены современные ретрансляторы СССР. Так в отечественной бортовой МЛА [1,2,3,4], демонстрировавшейся на международной выставке «МАКС-2009» формируется 32 луча для обслуживания территории РФ (рис. 1). Как правило, в качестве бортовых МЛА используются двухзеркальные гибридные антенны с большим (2...3 м) основным зеркалом для обеспечения требуемого КУ, что ограничивает выбор поляризации антенны и приводит к большому затенению [5]. С целью уменьшения падения КУ на краях зоны обслуживания, размеры малых зеркал выбираются близкими к размерам основного [6].

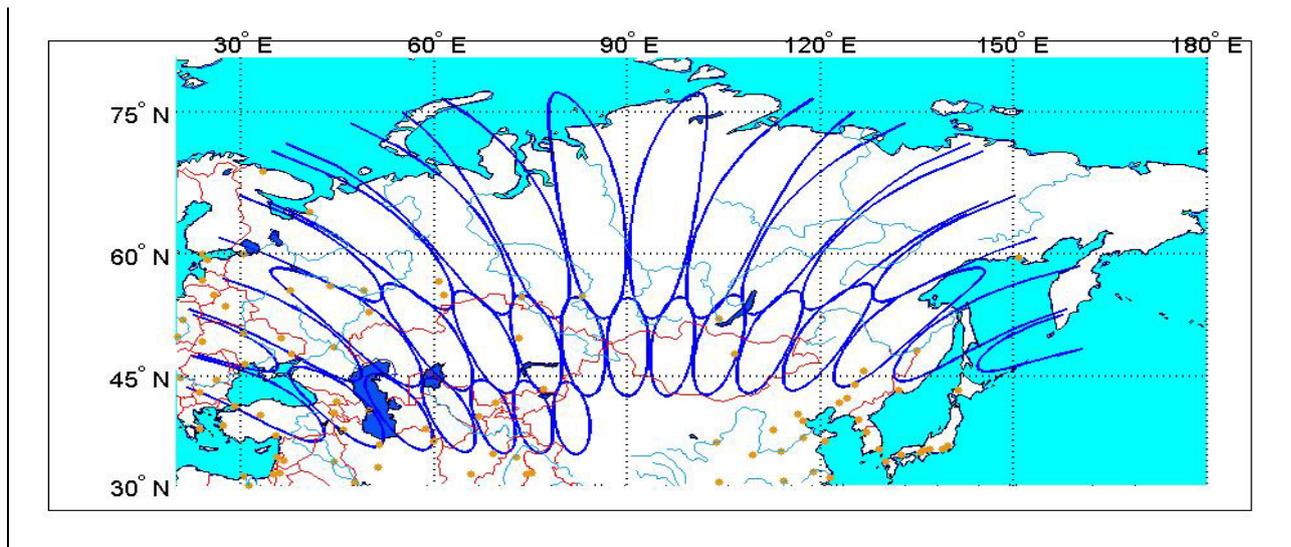


Рисунок 1.

Контуры одноградусных лучей бортовой антенны КА, базирующегося на ГСО в т. 90° в.д. в проекции на земную поверхность

Следующим недостатком применяемых двухзеркальных антенн с офсетным большим зеркалом является невозможность обеспечения апланатизма в двух плоскостях, что необходимо для снижения падения КУ на краях зоны обслуживания.

На зарубежных КА этот недостаток устраняется использованием нескольких МЛД с апертурами, формирующими веер остронаправленных лучей [6] (рис. 2), что приводит к тому, что антенные системы в основном определяют стоимость всей системы.

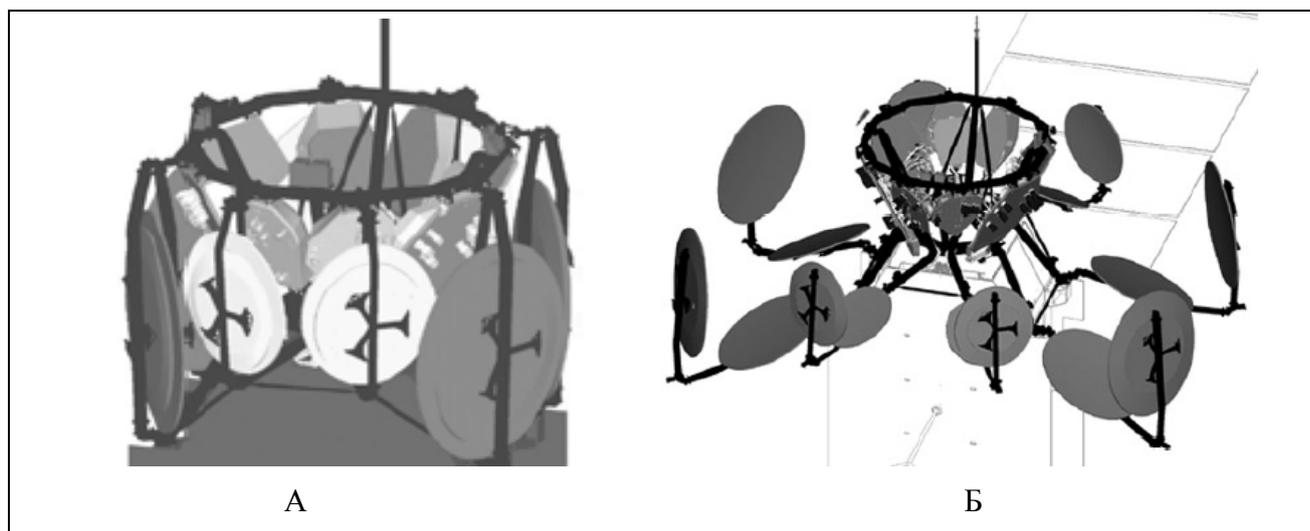


Рисунок 2.

Приёмо-передающая антенная система КА [6] компании TRW & Electronics.

А – транспортное положение; Б – рабочее положение

Крупноапертурный зеркальный излучатель МАР

Перспективным направлением построения многолучевых антенн является использования антенных решёток (АР). Учитывая, что для обеспечения требуемого КУ число излучателей в АР может достигать десятков и сотен тысяч, одной из актуальных задач при разработке многолучевой антенной решетки (МАР) для КА является разработка отдельного “оптимального” излучателя АР. Такой излучатель, с одной стороны, должен обеспечивать минимальное количество излучателей в МАР при сохранении рельефа КУ на требуемом уровне в заданном секторе обзора, а с другой, должен быть конструктивно выполним и многофункционален, например, по выбору оптимальной поляризации или возможности использования его в адаптивных антеннах. Ниже приводятся результаты оптимизации характеристик крупноапертурного излучателя МАР в виде однозеркальной антенны 1 с одним или с системой из n облучателей 2 в виде открытых концов круглого волновода, расположенных в фокальной плоскости (рис.3)

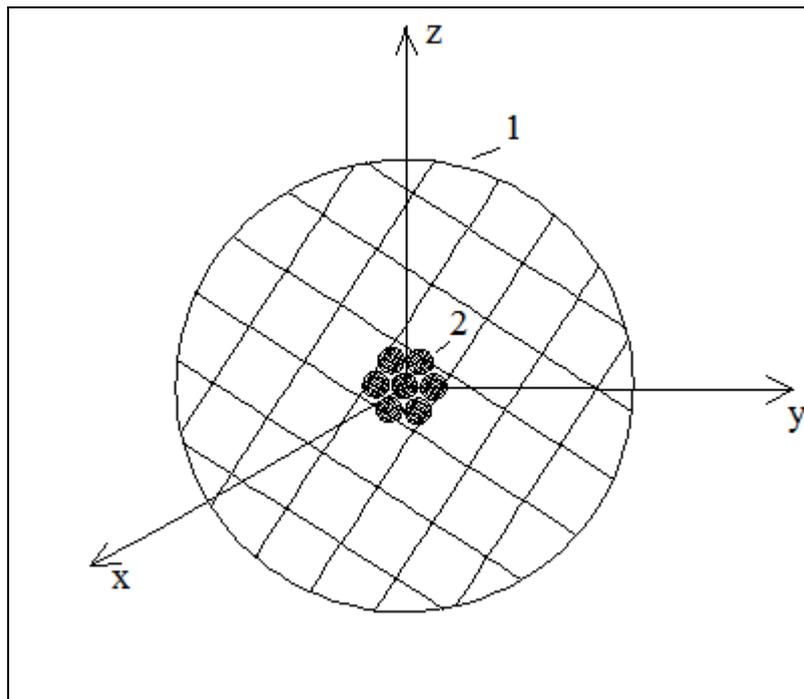


Рисунок 3.

Крупноапертурный излучатель

Исходными данными для оптимизации параметров излучателя, представленного на рис. 1, являются диапазон рабочих частот, сектор обзора и рельеф КУ в пределах этого сектора. Параметрами, которые определялись в процессе оптимизации, являются радиус R_0 и фокусное расстояние f зеркала, количество n отдельных круглых волноводов, входящих в со-

став облучателя, их размеры и взаимное расположение. Ниже все геометрические размеры указаны в длинах волны λ .

Определим минимальное количество отдельных излучателей в облучателе ЗА для обеспечения пространственного сектора обзора $\pm 8,7^\circ$. С этой целью обратимся к рис. 4 (а,б),

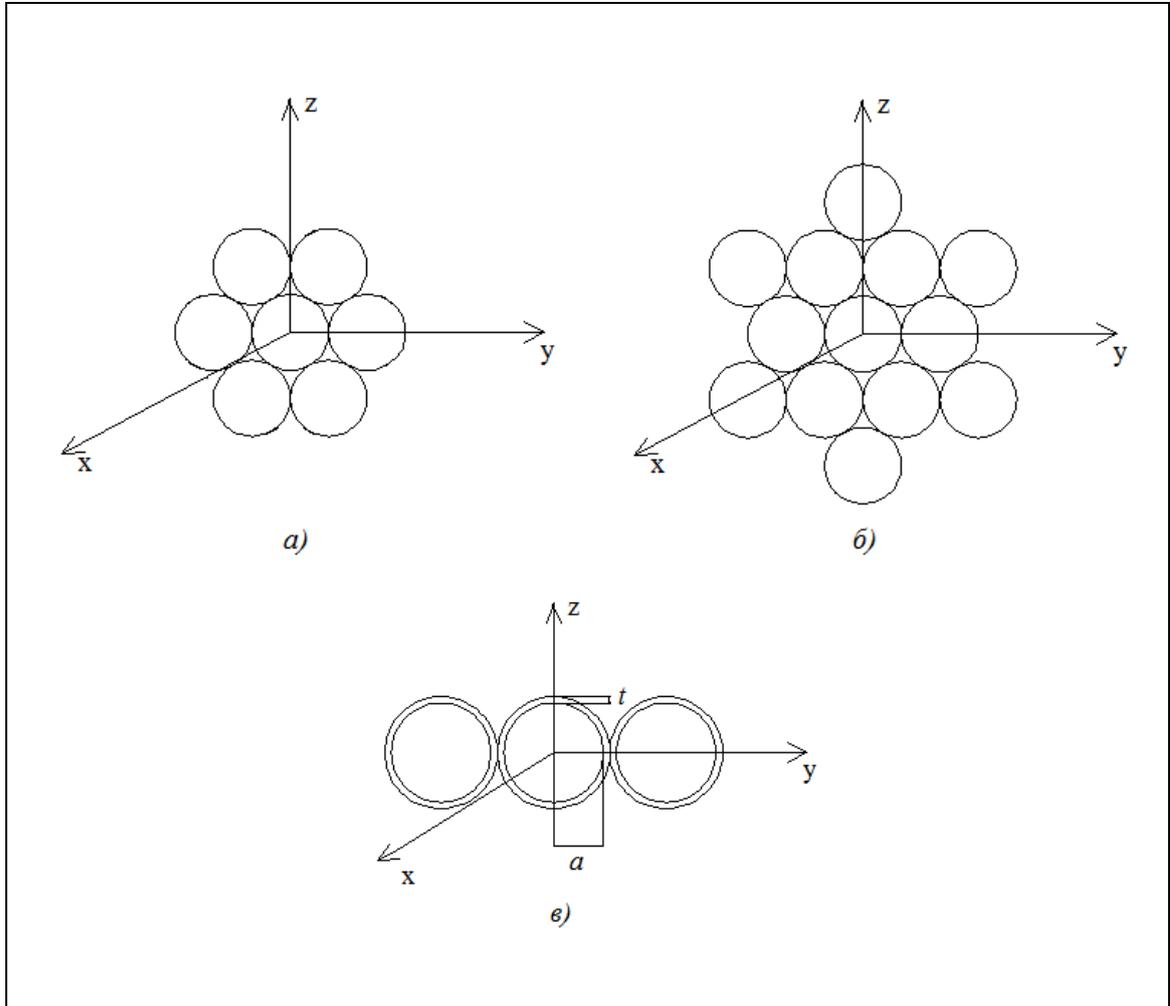


Рисунок 4.

а) – система из 7-и излучателей; б) – система из 13-и излучателей; в) – система из 3-х излучателей.

на котором показаны возможные конфигурации осесимметричных облучателей, состоящие из 7-и и 13-и открытых концов круглых волноводов конечной длины. Минимальное количество излучателей в облучателе можно определить из неравенства (1)

$$\sum_{m=1}^{n_{\min}} \left(1 - \cos\left(K_q \cdot \frac{\lambda}{4R} \cdot \frac{\cos(\theta_0^m) + 1}{2 \cos(\theta_0^m)}\right)\right) \geq 1 - \cos(\psi_{\text{обз}}), \quad (1)$$

где $2\psi_{\text{обз}}$ – сектор обзора, λ – длина волны, R – радиус зеркала, K_q – коэффициент пропорциональности.

В свою очередь коэффициент K_q определяется в соответствии с выражением (2).

$$\theta_q^m = K_q \cdot \frac{\lambda}{4R} \cdot \frac{\cos(\theta_0^m) + 1}{\cos(\theta_q^m)}, \quad (2)$$

где $2\theta_q^m$ – ширина ДН на уровне пересечения лучей.

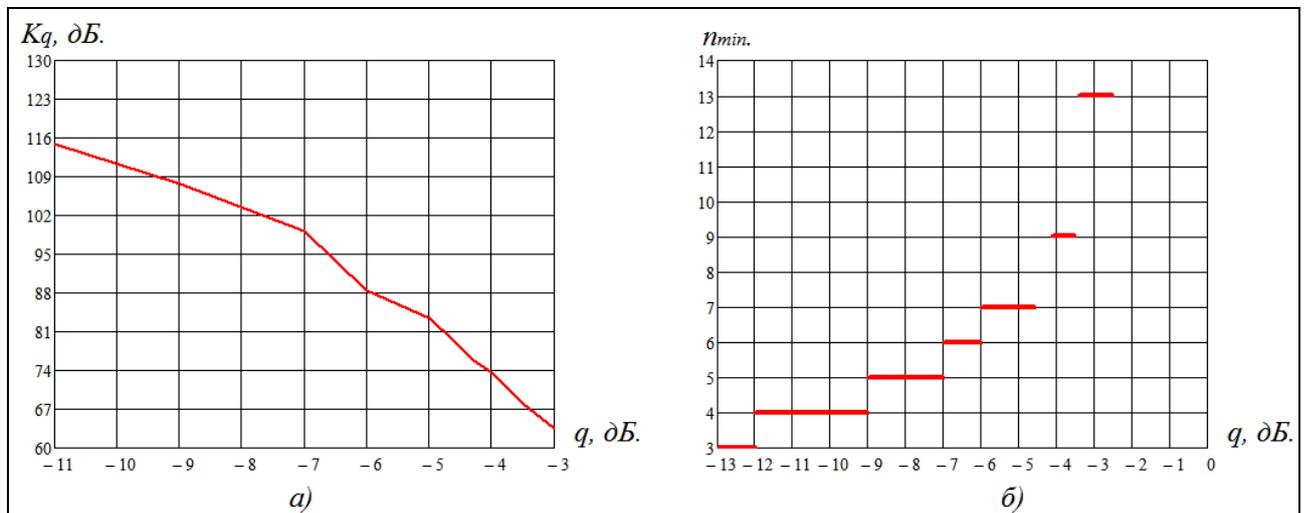


Рисунок 5.

а) – зависимость коэффициента пропорциональности K_q от уровня пересечения лучей; б) – зависимость минимального количества облучателей n_{\min} от уровня пересечения лучей

На рис. 5 представлена зависимость коэффициента пропорциональности K_q от уровня пересечения лучей и зависимость минимального количества облучателей n_{\min} от уровня пересечения лучей. Из рисунка 5б следует, что при уровне пересечения лучей $-4,6$ дБ, минимальное количество излучателей $n_{\min} = 7$, что соответствует конфигурации системы облучателей изображённой на рис. 4а. Для больших уровней пересечения, в частности «минус» 3 дБ, минимальное количество облучателей составляет $n_{\min} = 11$. Следовательно, целесообразно применять конфигурацию изображённую на рис. 4б. Из конфигурации показанной на рис. 4а, следует, что ширина каждого луча ДН системы облучателей приблизительно равна $5,8^\circ$, что позволяет вычислить радиус параболического зеркала $R_0 = 6.029$.

Определение оптимальных параметров крупноапертурного излучателя (фокусного расстояния, радиуса волновода, радиуса зеркала, расстояния между апертурами облучателя и зеркала и др.) первоначально проводилось на модели облучателя, состоящей из трех открытых концов круглого волновода (рис. 4в). В каждом волноводе возбуждалась лишь основная волна H_{11} . Моделирование излучателя проводилось с использованием комплексов компьютерного моделирования FEKO и специально разработанных пакетов программ, позволяющих проводить оптимизацию параметров и характеристик излучателя. Основными характеристиками полученными при моделировании являются: зависимость КУ $G(\theta)$ (дБ) и эффективно-

сти $g(\theta)$ (разы) от параметров зеркального излучателя в секторе обзора МАР, вид пространственной ДН излучателя $f(\theta, \varphi)$, уровня боковых лепестков Δ (дБ) и уровня пересечения q (дБ) соседних лучей ДН. Как следует из рис. 6, изменяя радиус облучателя a , можно повысить

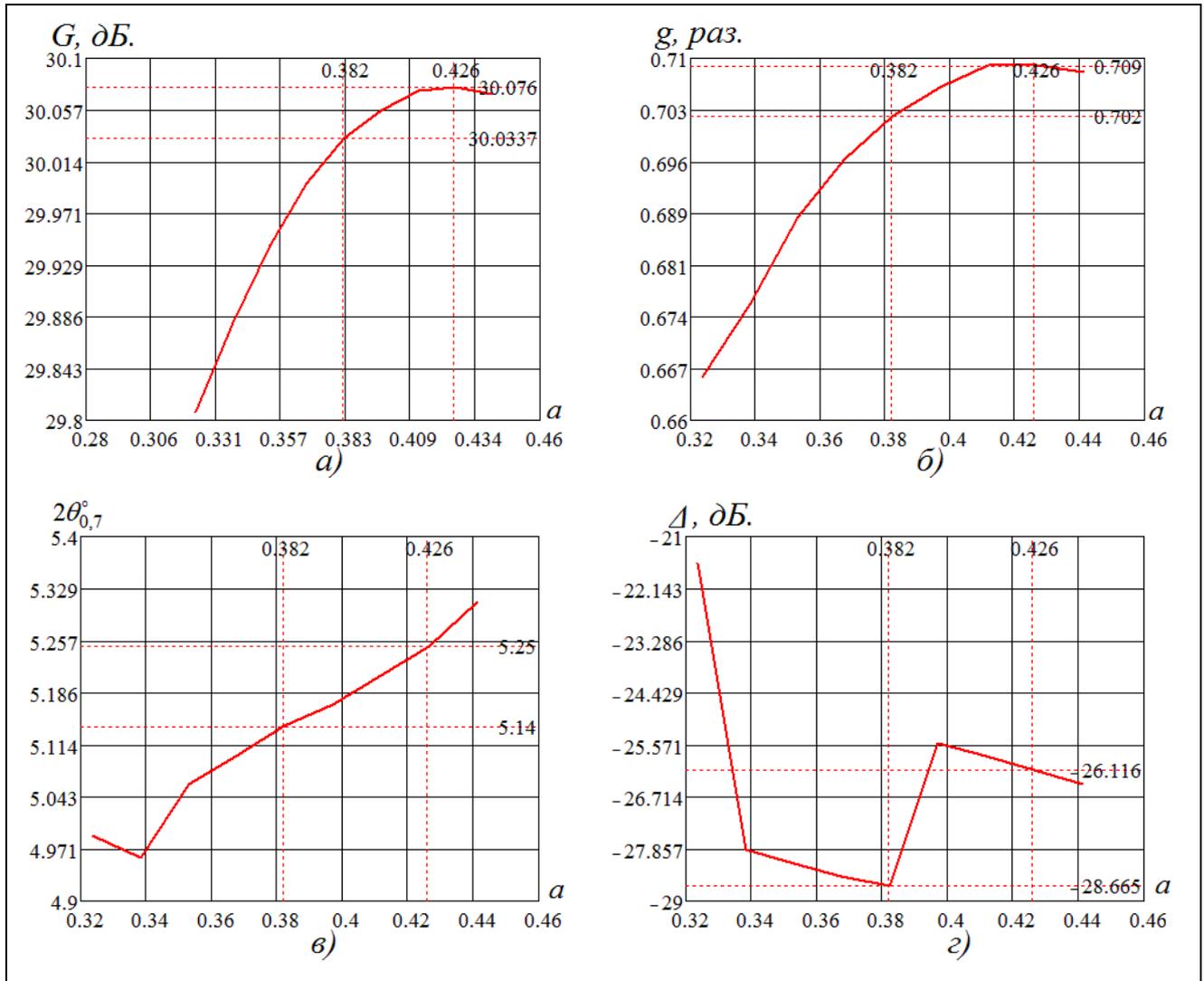


Рисунок 6.

Зависимости характеристик ЗА от отношения радиуса облучателя к длине волны коэффициент эффективности до 0,709. При этом максимум достигается при $a = 0,426$. Кроме того учитывая, что одноволновый режим работы круглого волновода обеспечивается при выполнении условия $0,294 < a < 0,382$, для обеспечения одноволнового режима при $a = a_{opt}$ вместо открытого конца волновода следует применять конический рупор. Увеличить КУ и, соответственно, коэффициент эффективности (до 0,71) возможно также оптимизацией смещения апертуры облучателя относительно фокальной плоскости зеркала (рис. 7).

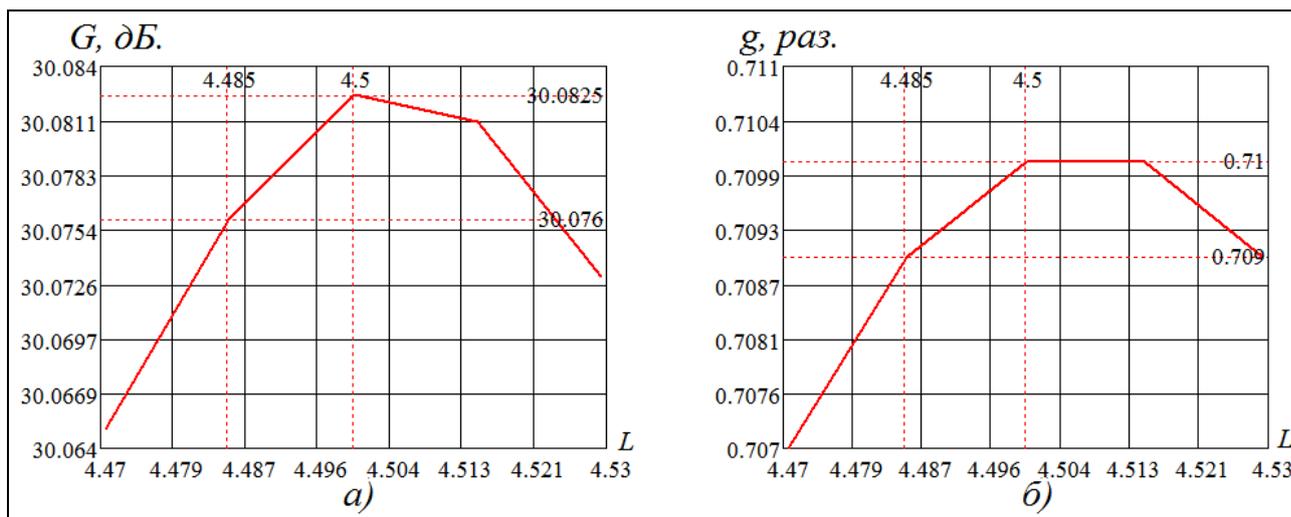


Рисунок 7.

Зависимость КУ и коэффициента эффективности от отношения смещения апертуры облучателя относительно апертуры зеркала к длине волны.

На рис. 8 показана ДН крупноапертурного излучателя с 3-х элементным облучателем в плоскости XOY (рис. 4в). Далее на рис. 9а приведены зависимости КУ центрального и отклонённых лучей

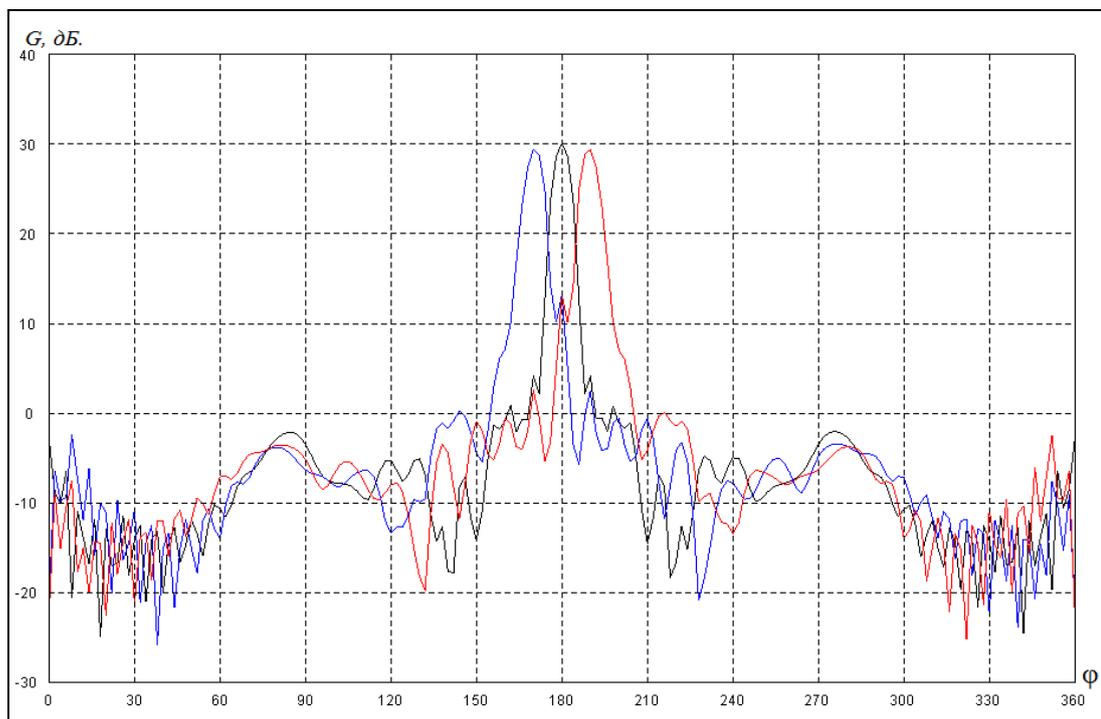


Рисунок 8.

ДН крупноапертурного излучателя с 3-х элементным облучателем.

(в направлении максимума ДН) от радиуса отдельного волноводного облучателя, причём расстояние между соседними излучателями выбиралось как $d = 2(a+t)$, где t – толщина стен-

ки волновода. На рис. 9б, 9в показаны зависимости уровней пересечения соседних лучей q_{12} , q_{13} и уровня боковых лепестков от a , при $t = 0,036$.

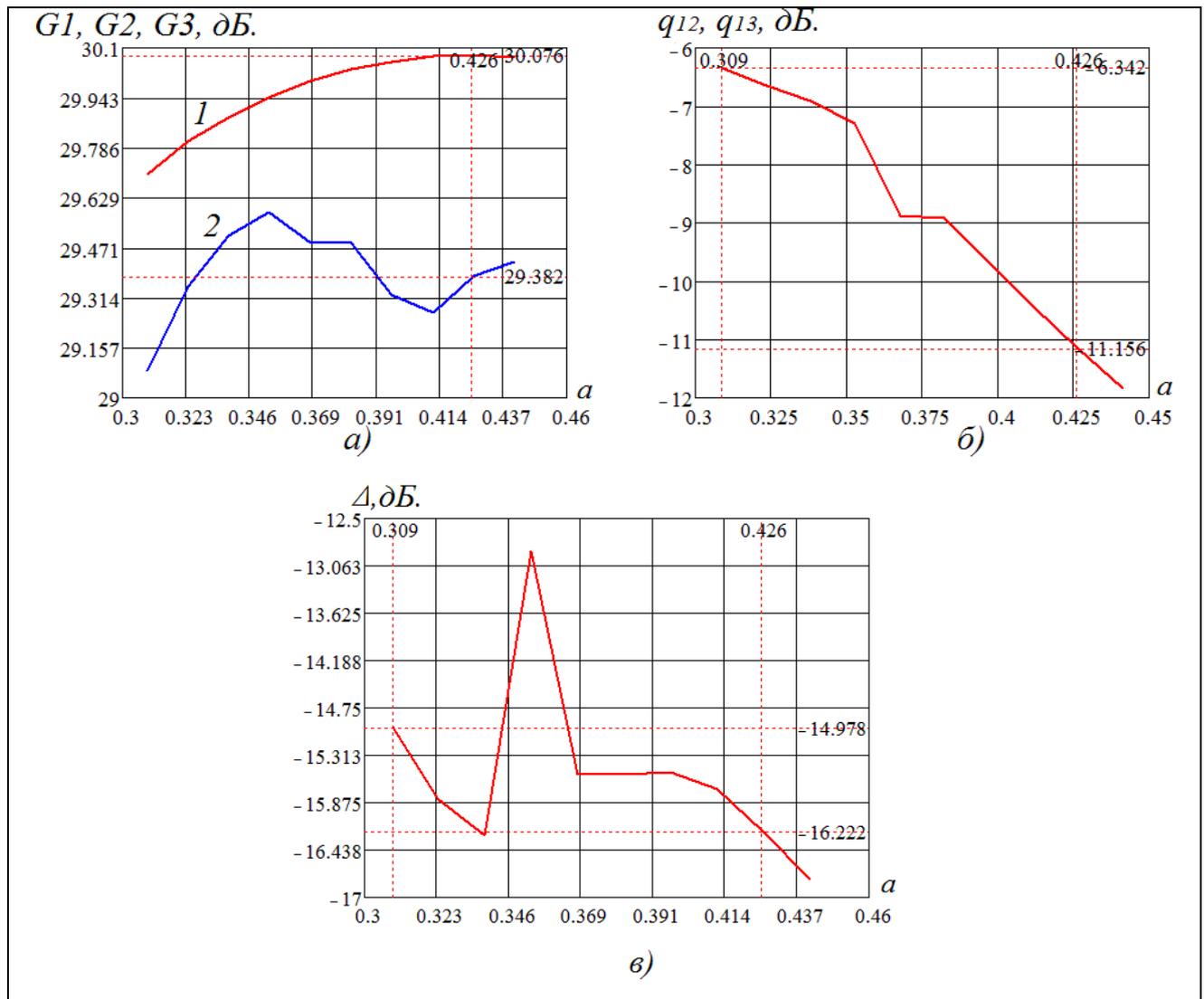


Рисунок 9.

Зависимости КУ, уровней пересечения лучей, УБЛ от отношения радиуса волновода к длине волны.

На рисунке 9а, кривая 1 соответствует зависимости КУ центрального луча, в направлении максимума ДН от радиуса волновода, а кривые 2 и 3 – КУ отклонённых лучей. Из рис. 9б видно, что при радиусе волноводного излучателя $a = 0,426$, которое, соответствует максимальному КУ центрального луча уровень пересечения составляет всего лишь $-11,2 \text{ дБ}$, что, скорее всего, приведёт к значительному провалу в направлении пересечения лучей. На рисунке 10 приводится КУ $G_{max}(\psi)$ для различных размеров радиуса волнопроводов a и соответственно для различных уровней пересечения q , где кривая 1 – соответствует радиусу облучателя $a = 0,309$ ($q = -6,34 \text{ дБ}$), кривая 2 – радиусу $a = 0,382$ ($q = -9,5 \text{ дБ}$),

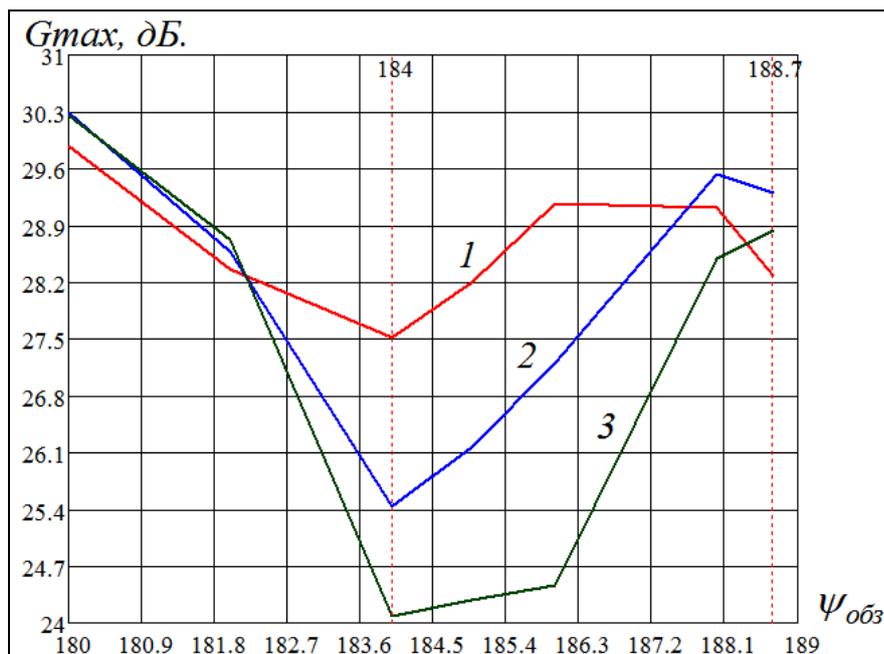


Рисунок 10.

Рельеф коэффициента усиления в секторе обзора $8,7^\circ$

а кривая 3 – радиусу $a = 0,441$ ($q = -11,1$ дБ). Таким образом, действительно в направлении пересечения лучей формируется глубокий провал в КУ, который даже вблизи границы критического режима составляет около -3 дБ.

Для устранения этих явлений необходимо повысить уровень пересечения соседних лучей как путём уменьшения расстояния d между соседними волноводами, так и с помощью увеличения ширины лучей ДН. Однако конструктивно дальнейшее сближение соседних волноводов возможно лишь при их диэлектрическом заполнении и соответственно уменьшении радиуса волновода. Поэтому дальнейшее моделирование проводилось для излучателя, состоящего из 7-и заполненных диэлектриком волноводов (рис. 4а) с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 1,6$. Для расширения ДН и обеспечения заданного сектора обзора был уменьшен радиус зеркала до величины $R_0 = 5,125$, при этом, для обеспечения заданного уровня пересечения соседних лучей ($q = -4,6$ дБ) оптимальный радиус волновода $a = 0,3$. На рисунке 11 представлены расчётные в главных плоскостях XOY и XOZ (в масштабе КУ) ДН облучателя из 7-и заполненных диэлектриком волноводов при независимом возбуждении каждого волновода, а на рис. 13 представлен рельеф максимального КУ

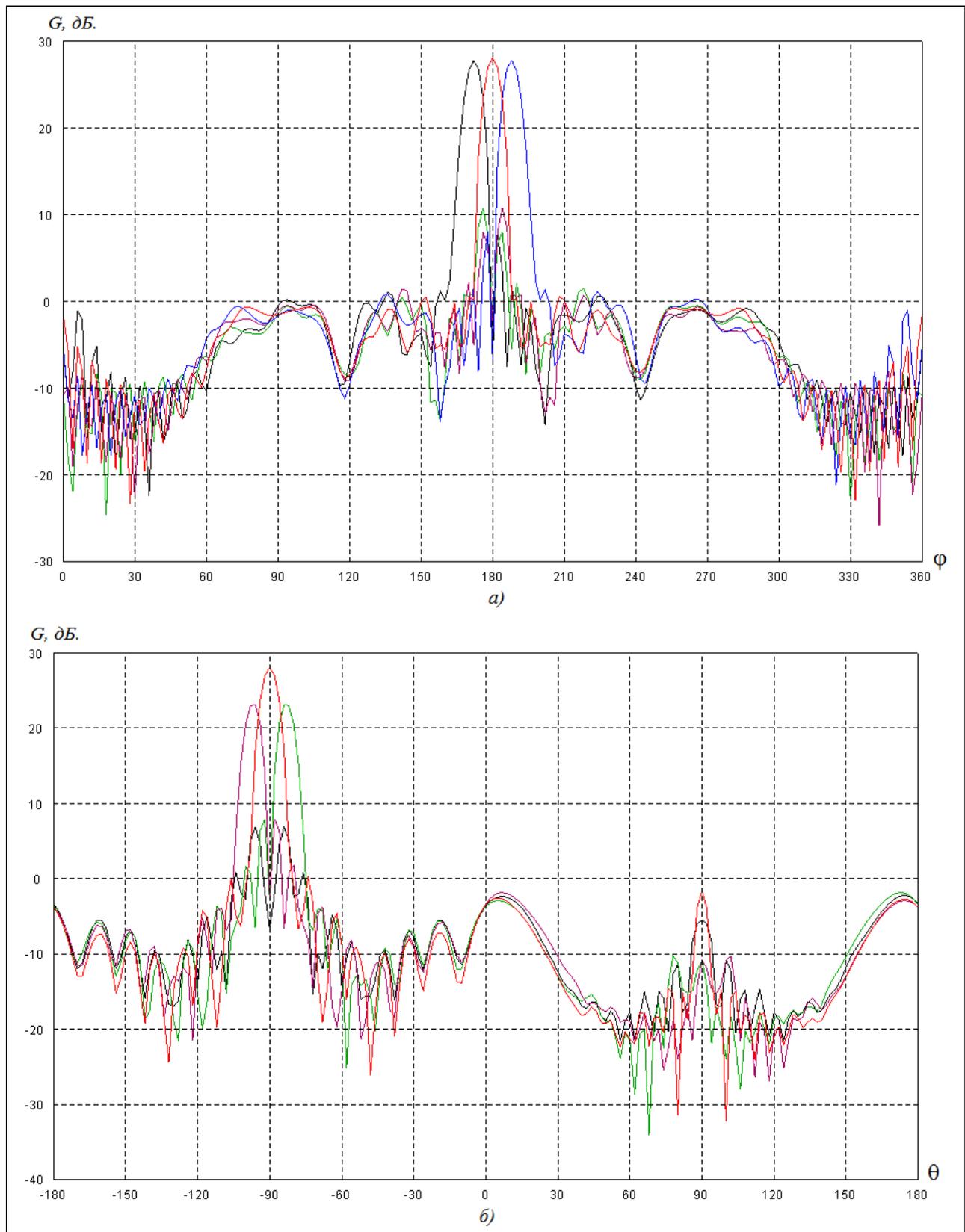


Рисунок 11.

a) – ДН 7-и лучевой ЗА с облучателем в виде системы волноводных излучателей, с диэлектрическим заполнением, в плоскости XOY.

б) – ДН 7-и лучевой ЗА с облучателем в виде системы волноводных излучателей, с диэлектрическим заполнением, в плоскости XOZ

рассматриваемой антенны $G_{\max}(\theta) = \sum_{m=1}^7 G_m(\theta)$.

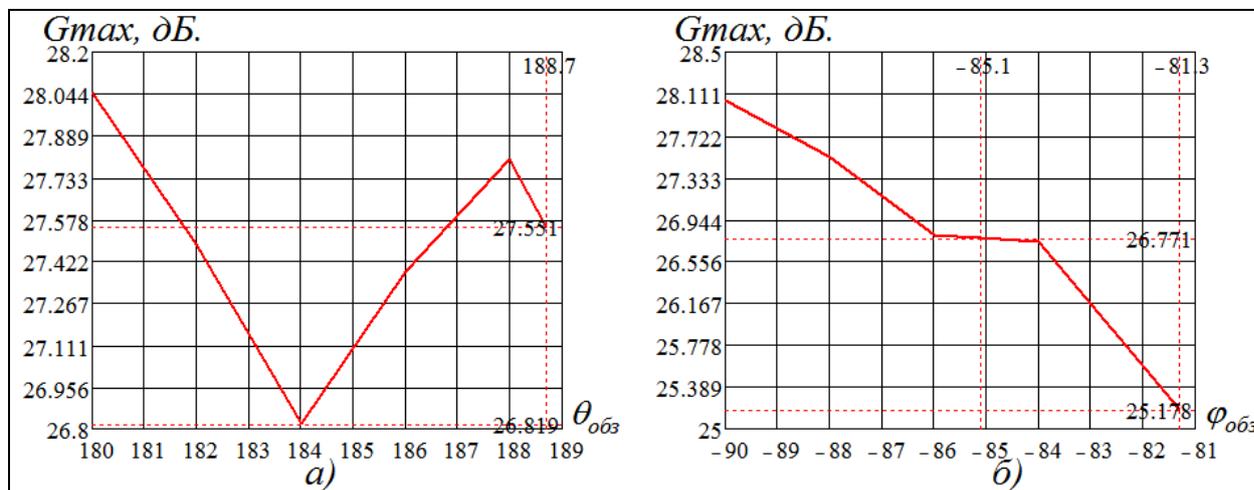


Рисунок 12.

Рельеф КУ 7-и лучевой ЗА с облучателем в виде системы волноводных излучателей, с диэлектрическим заполнением, в секторе обзора $8,7^\circ$ в плоскостях XOY и XOZ

Как видно, в плоскости XOY наблюдается сравнительно небольшой провал в КУ в направлении пересечения лучей на $1,23 \text{ дБ}$, а на краю сектора обзора падение КУ около $0,5 \text{ дБ}$. В плоскости XOZ в направлении пересечения лучей провал КУ составил $1,28 \text{ дБ}$, а на краю сектора обзора – $2,87 \text{ дБ}$. Отметим, что рельеф КУ в других плоскостях лежит в интервале, границы которого определяются кривыми на рисунках 12a и 12б. Таким образом разработан многолучевой крупноапертурный зеркальный осесимметричный излучатель с КУ вдоль оси зеркала более 28 дБ и в секторе обзора не ниже $26,77 \text{ дБ}$, что эквивалентно эффективности зеркального излучателя вдоль его оси $g=0,616$ и не ниже $0,46$ во всём секторе обзора.

КУ MAP, состоящей из таких излучателей определяется соотношением (3).

$$G_{MAP} = \sum_{i=1}^N G_i(\theta_0, \varphi_0) \approx N \cdot G_i(\theta_0, \varphi_0), \quad (3)$$

где $G_i(\theta_0, \varphi_0)$ – КУ отдельного излучателя MAP, N – количество излучателей. Зависимость количества излучателей от требуемого КУ MAP представлена на рис. 13.

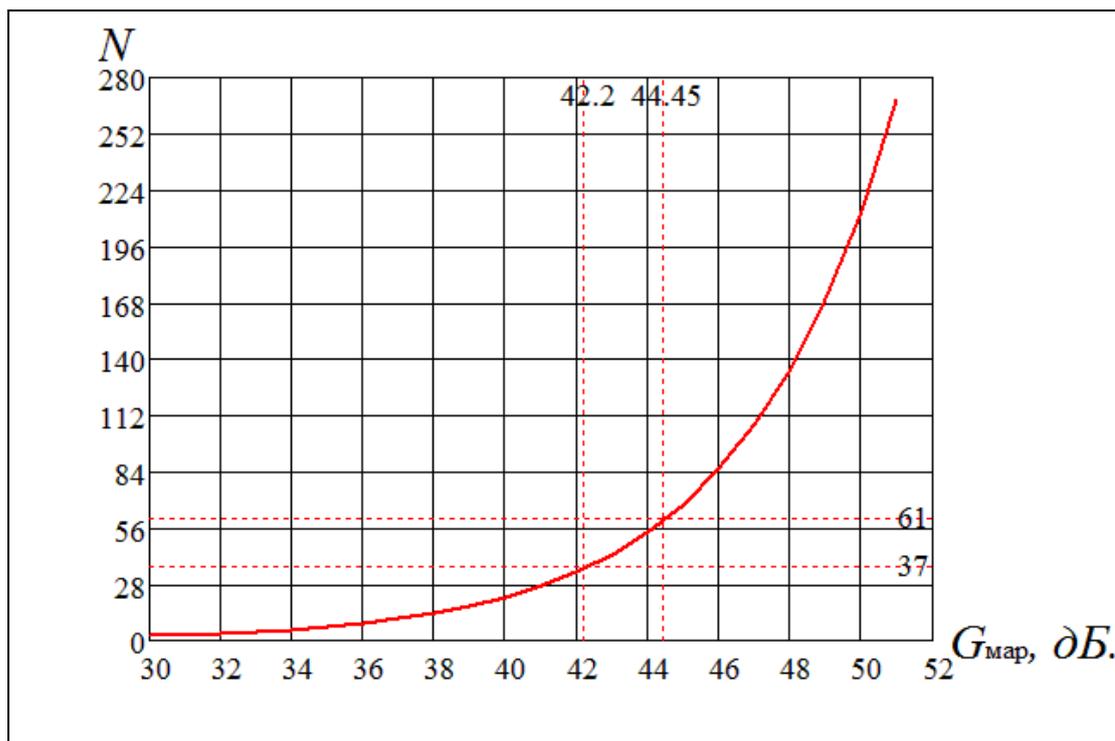


Рисунок 13.

Зависимость минимального количества излучателей от x КУ.

Заключение

Приведённые результаты позволяют выбрать оптимальную структуру зеркального крупноапертурного излучателя и минимальное количество этих излучателей в многолучевой антенной решётке для системы глобальной спутниковой связи.

Библиографический список.

1. А.М. Аносов, Н.А. Бей, В.А. Вечтомов. Применение бортовых многолучевых антенн в системах спутниковой связи. – Антенны, 2005, №10.
2. Бортовая многолучевая антенна космического ретранслятора / Бей Н.А., Вечтомов В.А., Гуркин Е.Н. и др.– М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, ISSN 0236-3933. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение», 2009.
3. Двухзеркальная система для антенны с широким сектором формирования лучей в одной плоскости. / Гуркин Е.Н., Коган Б.Л.– М.: МГТУ. им. Н.Э. Баумана, ISSN 0236-3933. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение», 2009.
4. Бей Н. А., Вечтомов В. А., Зимин В. Н. и др. // материалы XVI Междунар. Научно-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж, 2010, т. 2.
5. Бахрак Л. Д., Галимов Г.К. Зеркальные сканирующие антенны, М.: Наука, 1981.

6. C. Chandler, L. Hoey, D. Hixon, T. Smigla, A. Peebles, M. Em. Ka-band communications Satellite Antenna technology. – TRW Space & Electronics, One Space Park, Redondo Beach, California 90278, USA. email: chuck.Chandler@trw.com

Сведения об авторах.

Пономарев Леонид Иванович, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), профессор, д.т.н., тел.: 8 (495) 494-33-35.

Вечтомов Виталий Аркадьевич, ведущий научный сотрудник Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, кандидат технических наук.
vvechtomov@mail.ru

Милосердов Александр Сергеевич, аспирант Московского авиационного института (национального исследовательского университета). miloserdovas@mail.ru