

## ОЦЕНКА ГРАНИЦЫ ДАЛЬНЕЙ ЗОНЫ ЛИНЕЙНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

В.И. Замятин, А.Ф. Шевченко

(Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба)

*В статье рассматривается определение расстояния до ближней границы дальней зоны по различным параметрам диаграммы направленности антенны. На примере линейной антенной решетки, проведен расчет зависимости этих параметров и ошибок их определения от расстояния. Показана необходимость предварительной оценки границы дальней зоны для выбранного параметра диаграммы направленности при проведении теоретических и экспериментальных исследований антенн.*

**дальняя зона антенны, диаграмма направленности, параметр диаграммы направленности**

**Анализ исследований и публикаций.** Традиционно под дальней зоной (ДЗ) понимают область пространства, в которой интерференционную картину поля антенны, можно считать сложившейся [1]. Другие определения конкретизируют свойства поля в ДЗ. В частности, дальней зоной называют также [1 – 4]:

– область, при переходе в которую мощность поля антенны, начинает убывать обратно пропорционально величине  $r_0^2$  (где  $r_0$  – расстояние от центра антенны до точки наблюдения);

– часть пространства, зависимость поля от расстояния в которой имеет вид сферической волны;

– область, в которой лучи идущие от различных точек антенны в точку наблюдения, можно считать практически параллельными.

Как видно, все определения ДЗ напрямую связаны с расстоянием до ее ближней границы, которое определяется в соответствии с выбранным критерием. Обычно, в качестве такого критерия, принимают величину максимальной фазовой ошибки  $\Delta\psi$  возникающей из-за разности хода волн между центром и краем раскрыва. Чаще всего на практике ограничивают значение этой ошибки величиной  $\Delta\psi \leq \frac{\pi}{8}$ . Тогда расстояние до

ближней границы ДЗ (которое в оптике называют четырехкратным релейским расстоянием) определяется из выражения:

$$R_{\text{кл}} = \frac{2L^2}{\lambda}, \quad (1)$$

где  $L$  – линейный размер антенны;  $\lambda$  – длина волны, которое будем называть «классическим» критерием определения границы ДЗ [3, 4]. На наш взгляд нет необходимости приводить подробно изложенные в литературе [1, 5, 13] математические допущения для вывода (1). Во многих работах указано на то, что этот критерий является ориентировочным [4, 5, 6]. В частности в [6] отмечается, что расстояние, начиная с которого интерференционную границу картину поля можно считать сложившейся, зависит от: углов наблюдения; формы области занимаемой излучающими токами; характера амплитудно-фазового распределения.

Следует отметить, что это расстояние также зависит от вида пространственно-временной модуляции параметров сигнала в раскрыве антенны. Кроме того, определение ближней границы ДЗ связано с тем параметром диаграммы направленности (ДН) антенны, по которому производят оценку границы ДЗ. Как отмечено в [5], выбор этого параметра ДН может существенно влиять на расстояние до ДЗ. В работах, посвященных теории и практике измерения антенных параметров [7, 8] получены решения для ошибок измерения параметров антенн и их оценки в зависимости от расстояния для некоторых частных случаев.

**Постановка проблемы.** Зачастую необходимо предварительно оценить границу дальней зоны антенны при решении прикладных задач, а именно в случаях: проведения измерений параметров ДН конкретной антенны; решения задач математического моделирования, которое предполагает работу антенной системы в ее дальней зоне и др.

Кроме того, необходимость в предварительной оценке ближней границы ДЗ возрастает, из-за увеличения электрических размеров антенн современных радиотехнических комплексов [9]. Это связано: во-первых, с интенсивным освоением более коротких волн радиодиапазона (вплоть до миллиметровых и субмиллиметровых); во-вторых, с широким применением антенн с синтезированной апертурой. Для таких антенн граница дальней зоны существенно отодвигается, что затрудняет измерения параметров их ДН и моделирование работы антенны в ДЗ. Таким образом, задача предварительной оценки границы ДЗ является актуальной. Ее решение предполагает знание характера зависимости того или иного параметра ДН и ошибок его определения от расстояния.

**Целью данной статьи** является оценка зависимости различных параметров ДН и ошибок их определения в зависимости от расстояния, на примере линейной АР. В качестве этих параметров выбраны: амплитуда поля в направлении главного максимума, ширина главного лепестка,

уровень первого бокового лепестка амплитудной ДН, крутизна пеленга-ционной характеристики.

**Постановка задачи.** Рассмотрим линейную, эквидистантную АР, состоящую из достаточно большого количества излучателей равного  $2N + 1$  с расстоянием между элементами  $d$ , которую для простоты примем синфазной, с амплитудным распределением вида  $A(n) = A_n$ , где  $n$  – номер излучателя. Токи, в антенне положим гармоническими, с частотой  $\omega$ . Излучатели в решетке будем полагать слабонаправленными, а их количество достаточно большим. Сделанные допущения позволяют провести расчеты методом геометрической оптики, при котором набег фазы будем рассчитывать по лучам [11]. Амплитуду поля в точке наблюдения, можно представить как результат сложения амплитуд излучателей, составляющих решетку. При условии, что излучатели одинаково ориентированы в пространстве и идентичны – комплексная амплитуда поля АР сфокусированной в бесконечность в точке наблюдения Р будет пропорциональна

$$\dot{E}(P, t) \sim \dot{E}_0(\theta, t) \sum_{n=-N}^N \frac{A_n}{r_n} \cdot \exp\left\{-j \left[ \omega \cdot \frac{r_n}{c} - r_0 \right]\right\} \cdot \exp\{j \cdot \omega \cdot t\}, \quad (2)$$

где  $\dot{E}_0(\theta, t) \sim \frac{\exp\{-j(k \cdot r_0)\}}{r_0} \cdot \dot{F}_0(\theta, t)$  – комплексная амплитуда поля еди-

ничного излучателя решетки с диаграммой направленности  $F_0(\theta, t)$  и волновым числом  $k = \frac{\omega}{c}$ ;  $r_0$  – расстояние от центра решетки до точки

наблюдения;  $r_n = \sqrt{x_n^2 + r_{0p}^2 + 2x_n r_{0p} \cdot \cos(\theta)}$  – расстояние от  $n$ -го элемента до точки наблюдения Р;  $x_n = nd$  – расстояние от текущего излучателя до центрального элемента решетки (рис. 1);  $c$  – скорость света;  $\omega$  – круговая частота.

Сделанные допущения позволяют считать ДН элементов вблизи главного максимума амплитудной ДН решетки и ее первых боковых лепестков одинаковыми. В таком случае амплитудная диаграмма направленности полностью определяется множителем решетки, который и будет рассчитываться в дальнейшем.

Величину абсолютной ошибки определения параметра ДН будем определять выражением [10]:

$$\Delta_R = 1 - \frac{\Lambda_R}{\Lambda_\infty}, \quad (3)$$

где  $\Lambda_R$  – значение параметра  $\Lambda$ , на расстоянии  $R$ ;  $\Lambda_\infty$  – значение параметра на расстоянии близком к бесконечности (в расчетах примем его равным  $100 R_{кл}$ ).

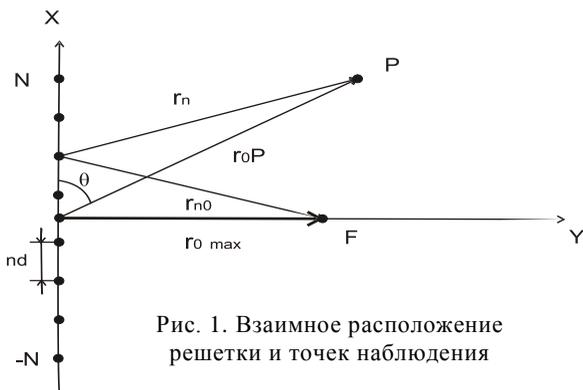


Рис. 1. Взаимное расположение решетки и точек наблюдения

Как упоминалось, "классический" критерий оценки ДЗ нельзя назвать универсальным. Его использование, в ряде случаев будет давать ошибки, которые снижают точность оценки границы ДЗ по конкретному параметру ДН. Из-за распространенности (1)

в практических расчетах следует определить абсолютную ошибку определения параметров ДН на «классическом» расстоянии до ДЗ.

Результаты математического моделирования приведены на рис. 2 – 9 для следующих исходных данных:

– расчетная модель линейной АР для которой  $N = 32$ ,  $d = 0,7 \lambda$  представлена на рис. 1;

– амплитудное распределение примем спадающим к краям решетки вида «косинус на подставке» (4) для случаев  $\Delta = 0,2; 0,5; 1$  последний из, которых будет соответствовать равномерному распределению амплитуд. Амплитудное распределение в решетке рассчитывалось из выражения

$$A_n = \Delta + (1 - \Delta) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot n}{2N}\right). \quad (4)$$

**Зависимость уровня главного максимума ДН АР от расстояния до точки наблюдения.** Для расчетов значения амплитуды поля линейной АР в направлении главного максимума (НГМ) использовалось выражение (2). В него вместо величины  $r_n$ , подставлялась  $r_{n0}$  – дальность от текущего элемента до точки наблюдения на фокальной оси F (которая определяется из рис. 1):

$$r_{n0} = \sqrt{x_n^2 + r_{0f}^2},$$

где:  $r_{0f}$  – расстояние от центрального элемента до точки наблюдения F.

Вычисления проводились на расстояниях  $r_{0f} = (0,1 \div 10) R_{кл}$ . Величину абсолютной ошибки определения границы ДЗ по уровню амплитуды поля в НГМ будем определять в соответствии с (3) как

$$\Delta E = 20 \lg\left(1 - \frac{E_R}{E_\infty}\right).$$

Результаты расчетов представлены на рис. 2 – 3, расстояние до точки наблюдения на них отложено в единицах  $R_{\text{кл}}$ .

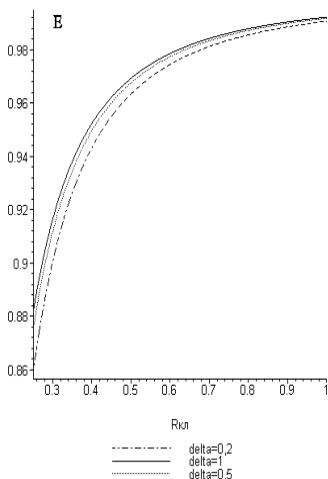


Рис. 2. Зависимость амплитуды поля в НГМ ДН от дальности до точки наблюдения ( $\Delta = 1; 0,5; 0,2$ )

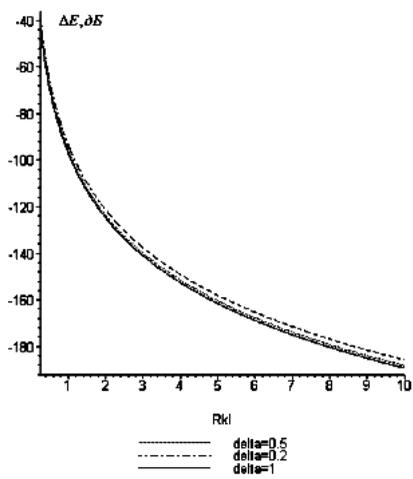


Рис. 3. Зависимость абсолютной ошибки определения амплитуды поля в НГМ ДН от дальности до точки наблюдения ( $\Delta = 1; 0,5; 0,2$ )

Расчеты показывают, что амплитуда поля с приближением точки наблюдения к решетке уменьшается тем быстрее, чем больше спадает амплитудное распределение к краям раскрыва. Это связано с уменьшением эффективной длины решетки по мере приближения распределения амплитуд в (4) к косинусоидальному. При этом абсолютные ошибки определения амплитуды поля в НГМ растут с уменьшением дальности до точки наблюдения. Кроме того, они растут тем быстрее, чем больше спадает амплитуда поля к краям решетки. Рис. 3 показывает, что определение ближней границы ДЗ по этому параметру возможно на расстояниях меньших  $R_{\text{кл}}$  с небольшой величиной абсолютной ошибки, так на расстояниях  $(0,4 \div 0,45) R_{\text{кл}}$  ее значение не превысит  $\Delta E \leq -30$  дБ. Как видно из рис. 3 ошибка определения границы ДЗ по «классическому» критерию не превышает  $-95$  дБ.

**Зависимость ширины главного лепестка амплитудной ДН от расстояния до точки наблюдения.** Расчеты проводились для дальностей от  $0,1R_{\text{кл}}$  до  $R_{\text{кл}}$ , с целью определения возможности оценки границы ДЗ по данному параметру ДН решетки, на ограниченных расстояниях. Ширину амплитудной диаграммы направленности будем определять на уровне  $-3$  дБ от максимального значения. Величину абсолютной ошибки определе-

ния ширины ГМ ДН решетки будем определять в соответствии с (3):

$$\Delta_{\theta} = \left( \frac{2\theta_R}{2\theta_{\infty}} - 1 \right).$$

Результаты расчетов показывают, что с уменьшением расстояния до точки наблюдения ширина ГМ ДН и уровень первого БЛ растет тем быстрее, чем больше АР спадает к краям. По мере приближения к решетке, наблюдается эффект «заплывания нулей» ДН. Главный лепесток, расширяясь, поглощает ближайший боковой на расстоянии  $r_n = (0,1 \div 0,2)R_{кл}$ .

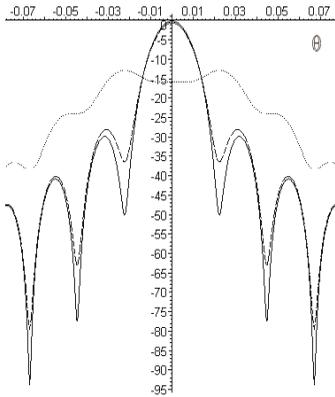


Рис. 4. Зависимость формы амплитудной ДН от дальности, при равномерном распределении амплитуд ( $-R_{кл}$ ;  $---$  $0,5R_{кл}$ ;  $\dots$  $0,2R_{кл}$ )

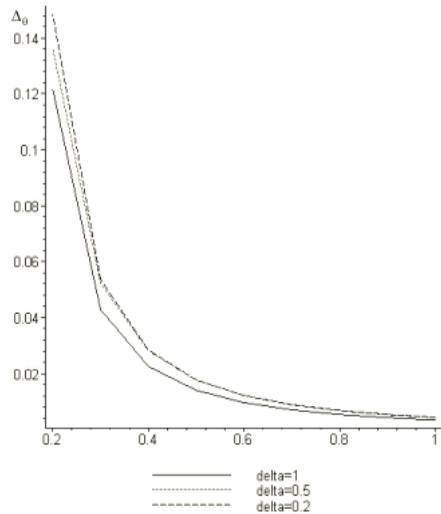


Рис. 5. Зависимость абсолютной ошибки определения ширины ДН от расстояния

Анализ рис. 5 показывает, что значения абсолютных ошибок растут тем быстрее, чем больше спадает амплитуда к краям раскрыва. Определение границы ДЗ по ширине ДН на дальностях около  $0,5R_{кл}$  возможно с абсолютной ошибкой  $\Delta_{\theta} \leq 0,02$  и на расстояниях  $(0,25 \div 0,2)R_{кл}$  с ошибкой  $\Delta_{\theta} \leq 0,12$ , для любого из рассмотренных амплитудных распределений. Как видно «классический» критерий оценки по этому параметру ДН позволяет определять границу ДЗ с достаточно высокой точностью.

**Зависимость уровня первого бокового лепестка ДН от расстояния до точки наблюдения.** Величину относительной ошибки определения уровня первого бокового лепестка (БЛ) ДН решетки будем опреде-

лять в соответствии с (3):

$$\Delta F = 20 \lg \left( \frac{F_R}{F_\infty} - 1 \right)$$

Анализ рис. 6 показывает, что величина ошибки  $\Delta_f$  по мере приближения к решетке, также растет быстрее при спадающем к краям амплитудном распределении. Видно, что ошибки определения границы ДЗ от расстояния имеют большее значение, чем в предыдущем случае. Так, определять границу ДЗ по уровню первого бокового лепестка с абсолютной ошибкой  $\Delta_f \leq -38$  дБ, можно на расстояниях  $(0,2 \div 0,25)R_{кп}$ , т.е. ошибки определения ДЗ по уровню БЛ больше зависят от дальности, чем ошибки определения ДЗ по ширине ДН. Полученные результаты согласуются с результатами, полученными в [8].

Можно сказать, что применение «классического» критерия оценки границы ДЗ по ширине ДН, уровню первого БЛ, амплитуде поля в НГМ для линейной АР необходимо и оправдано в расчетах, которые предполагают высокую точность оценки порядка 98 – 99% от абсолютного значения ошибки определения границы ДЗ. Во многих случаях практики эти требования могут быть ослаблены, с целью значительного сокращения (вполовину и более) расстояний до границы ДЗ по этим параметрам ДН. При этом точность оценки границы ДЗ будет оставаться довольно высокой.

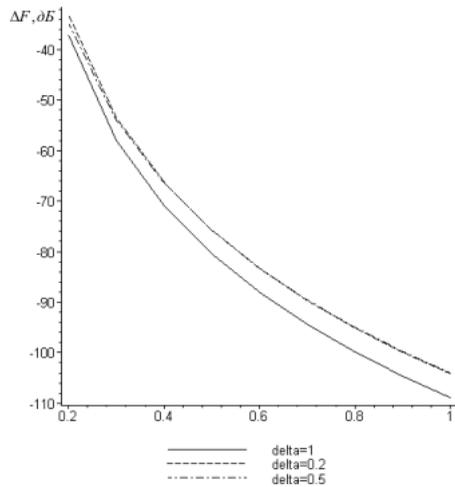


Рис. 6. Зависимость абсолютной ошибки определения уровня БЛ от расстояния

**Зависимость крутизны пеленгационной характеристики от дальности.** Так как пеленгационная характеристика (ПХ) определяет точностные параметры РЛС сопровождения, необходимо рассмотреть ее зависимость от дальности до точки наблюдения и оценить ошибки определения границы ДЗ по ней. Известно, что разностная ДН антенны полностью определяет ПХ. Рассмотрим разностную ДН которую формирует линейная АР при фазовом методе пеленгации. Для этого решетку условно разделим на две равные части (подрешетки) с расстоянием между

краями равным –  $d$ . В решетке применим нечетносимметричное относительно центра решетки амплитудное распределение вида «косинус на подставке». Выражение для множителя решетки запишем в виде:

$$\dot{E}_{1(2)}(P) \sim \frac{r_0}{r_{1(2)n}} \sum_{n=1(-N)}^{N(-1)} \frac{A_{1(2)n}}{r_{1(2)n}} \cdot \exp\left\{-j \left[ k(r_{1(2)n} - r_0) \right]\right\},$$

где  $r_{1(2)n} = \sqrt{x_{1,2n}^2 + r_{0p}^2} + 2x_{1(2)n}r_{0p} \cdot \cos(\theta)$  – расстояние от текущего элемента подрешетки до точки наблюдения  $P$ , в котором расстояние от текущего элемента до центра решетки  $x_{1(2)n} = nd \pm \frac{d}{2}$ ;  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  – волновое число. Выражение для амплитудного распределения в решетке запишем в виде:

$$A_{1(2)n} = \Delta + (1 - \Delta) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot x_{1(2)n}}{L}\right)$$

где  $L = 2N \cdot d$  – длина решетки.

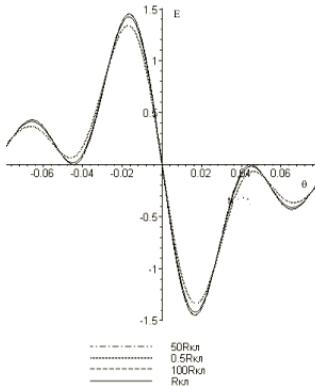


Рис. 7. Зависимость формы разностной ДН от дальности ( $100R_{кл}$ ;  $50R_{кл}$ ;  $1R_{кл}$ );  $0,5R_{кл}$ )

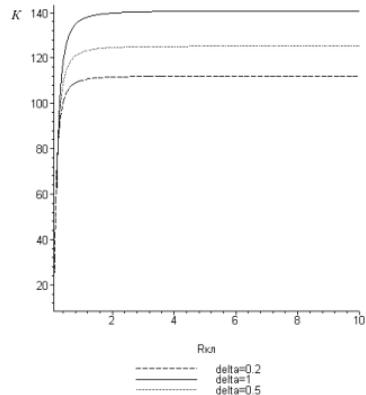


Рис. 8. Зависимость крутизны разностной ДН от дальности распределения

Разностная ДН будет определяться в соответствии с выражением:

$$\dot{E}_{\Delta} = \Im(\dot{E}_1(P)) - \Im(\dot{E}_2(P)).$$

Оценивать границу ДЗ будем по крутизне ПХ, которую найдем из выражения [12]:

$$K = \left. \frac{\partial E_{\Delta}(\theta)}{\partial \theta} \right|_{\theta=0}.$$

Абсолютная ошибка определения крутизны ПХ была рассчитана по

формуле:

$$\Delta K = \left(1 - \frac{K_R}{K_\infty}\right).$$

По мере приближения к решетке, как и для ДН АР происходит снижение уровня и расширение главных лепестков.

Как видно из рис. 8. крутизна ПХ с расстоянием растет, приближаясь к постоянной величине. Значение этой величины, зависит от уровня пересечения парциальных диаграмм подрешеток и вида амплитудного распределения в них [12]. Из рис. 9 видно, что ошибки определения крутизны с растут тем больше, чем ближе амплитудное распределение в решетке к равномерному. При этом ошибки определения границы ДЗ по крутизне ПХ больше, чем по

всем ранее рассмотренным параметрам ДН. Таким образом, проведенные расчеты показывают, что ошибки определения границы ДЗ по параметрам ДН которые определяются структурой поля вблизи антенны, более чувствительны к расстоянию. Приведенные выше результаты справедливы при измерении параметров с помощью ненаправленной вспомогательной антенны, размеры которой много меньше исследуемой. Применение слабонаправленных антенн (к примеру, диполя) может быть затруднено влиянием посторонних излучений. То есть возникает проблема взаимной связи между антеннами [2]. В таком случае, как показано в [7] при определении минимального расстояния на котором можно говорить о том, что ДЗ сформировалась, требуется исходить из суммарной относительной ошибки определения параметра ДН  $\Delta_A$ . Она складывается из ошибок определяемых отдельно для АР вспомогательной антенны. Суммарная ошибка, в свою очередь, будет зависеть от различных факторов в частности от угла, под которым видна вспомогательная антенна из центра решетки и др.

**Выводы.** Расстояние до ближней границы дальней зоны определяется исследуемым параметром диаграммы направленности, и суще-

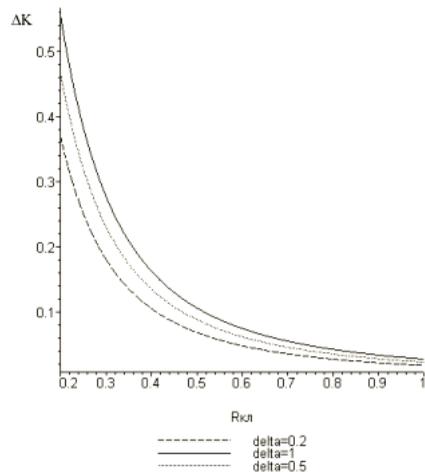


Рис. 9. Зависимость абсолютной ошибки определения крутизны ПХ от расстояния

ственно зависит от необходимой точности его определения.

При теоретических и экспериментальных исследованиях антенн предварительно необходимо оценивать расстояние до дальней зоны;

Использование «классического» критерия оценки ближней границы ДЗ для большинства рассмотренных параметров ДН является достаточным при инженерных исследованиях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Фельд Я.Н., Бененсон Л.С. *Антенны сантиметровых и дециметровых волн. В 2-х частях.* – М.: ВВИА, 1955. – Ч. 1. – 207 с.
2. Шифрин Я.С. *Антенны.* – Х.: ВИРТА, 1976. – 408 с.
3. *Справочник по радиолокации / Под ред. М. Скольника; Нью-Йорк, 1970; Пер. с англ. под ред. П. И. Дудника.* – М.: Советское радио, 1977. – Т. 2. – 408 с.
4. *Методы измерения характеристик антенн СВЧ. / Под ред. Н.М. Цейтлина.* – М.: Радио и связь, 1985. – 368 с.
5. *Сканирующие антенные системы СВЧ / Под ред. Р. Хансена.* – М.: Сов. радио, 1966. – 536 с.
6. Шифрин Я.С., Бородавко Ю.М., Назаренко В.А. *Статистика линейной антенны в зоне Френеля.* – Х.: ХИРЭ, 1986. – 162 с.
7. Фрадин А.З., Рыжков Е.В. *Измерение параметров антенно-фидерных устройств: 2-е изд. доп.* – М.: Связь, 1972. – 352 с.
8. Кинбер Б.Е., Цейтлин В.Б. *О погрешности измерения коэффициента направленного действия и диаграммы направленности антенн на близких расстояниях // Радиотехника и электроника.* – 1964. – Т. 9, вып. 9. – С. 1581-1593.
9. *Развитие радиоэлектронной техники радиолокационных систем. / Р.Н. Акиншин, Р.П. Быстров, Е.В. Кузнецов и др. // Успехи современной радиоэлектроники.* – 2005. – № 5. – С. 24-57.
10. Хемминг Р.В. *Численные методы (для научных работников и инженеров).* – М.: Наука, 1972. – 400 с.
11. Менцер Дж.Р. *Дифракция и рассеяние радиоволн.* – М.: Сов. радио, 1958. – 148 с.
12. Леонов А.И., Фомичев К.И. *Моноимпульсная радиолокация: 2-е изд., перераб. и доп.* – М.: Радио и связь, 1984. – 312 с.
13. Стреттон Дж.А. *Теория электромагнетизма / Пер. с англ.; под ред. С.М. Рытова.* – М - Л.: ОГИЗ, 1948. – 538 с.

Поступила 21.12.2005

**Рецензент:** доктор технических наук, профессор В.И. Карпенко,  
Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба.