

Камаев Р.Р., Капаров А.С.

**ОДИН ИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПОЛЯ ЗА ПРЕПЯТСТВИЕМ**

УДК : 621.371.621396.6

**Постановка задачи.**

Практический интерес представляет коэффициент передачи на закрытом радиорелейном интервале. Более или менее ясное представление об этом имеется лишь для случая, когда затеняющее препятствие достаточно гладкое. В этом случае можно по известным формулам рассчитать множитель ослабления. Что касается диаграммы приемной антенны, то она остается приемно такой, как и в поле свободного пространства.

На практике встречаются интервалы, где профиль затеняющего препятствия достаточно резко меняется в пределах нескольких соседних зон Френеля. В этом случае для определения характеристик такого интервала требуется специальное рассмотрение.

Анализ этого случая проведем в предположении, что затеняющее препятствие плоское (теневая идеология). Полученные данные при такой постановке естественно не будут точными при определении абсолютного уровня напряженности поля, однако относительные характеристики трассы (распределение поля перпендикулярно створу, диаграмма направленности приемной антенны и т.п.) могут быть найдены сравнительно точно.

**Множитель ослабления.**

Для интервала АВ, затененного полуплоскостью высотой  $h$  (см. рис.1) множитель ослабления

$$V = \frac{1}{2\pi h} \sqrt{\frac{\lambda R_1 R_2}{R_1 + R_2}} \tag{1}$$

где  $R_1$  и  $R_2$  длины полуинтервалов,  $\lambda$  - длина волны. Для примера  $R_1 = 6700$ м,  $R_2 = 1600$ м,  $\lambda = 2,73$ см ( $f = 7$ ГГц) имеем  $V = \frac{0.945}{h}$  ( $h$  в метрах). На рис.2 приведена зависимость множителя ослабления для этого случая. Видно, что при  $h = 30$ м множитель ослабления около 30дБ. Реально с учетом отличия препятствия от полуплоскости затухание на трассе будет еще больше.

**Общие формулы для распределения поля.**

Пусть теперь кромка препятствия  $\Gamma$  отлична от прямой (рис.3) и задается равенством  $y=f(x)$ . Тогда поле в точке В, отнесенной от створа на расстояние  $u$  (см. рис.4) пропорционально

$$E_{B1}(u) = \int_{\Gamma} \frac{1}{f(x)} e^{-i\beta(AC^1 + C^1B^1)} dx, \tag{2}$$

где  $AC^1$  - путь луча от пункта А до текущей точки кромки  $C^1$ ,  $C^1B^1$  путь луча от этой точки до пункта  $B^1$ ,  $1/f(x)$  - величина, пропорциональная коэффициенту дифракции в точке С.

Имеем

$$AC^1 = \sqrt{R_1^2 + x^2 + f^2(x)} = R_1 + \frac{x^2 + f^2(x)}{2R_1},$$

$$C^1B^1 = \sqrt{R_2^2 + (x-u)^2 + f^2(x)} = R_2 + \frac{(x-u)^2 + f^2(x)}{2R_2}$$

Выражение (2) целесообразно нормировать к нулю от полуплоскости с закрытием  $h$  по створу В ( $f(0)=h$ ) в точке приема по створу В ( $u=0$ ). Имеем при  $f(x)=h=0$ , опуская фазовые множители,

$$E_B(0) = \frac{1}{h} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\beta(\sqrt{\lambda R_1} + \sqrt{\lambda R_2})x^2} dx = \frac{\sqrt{\lambda \tilde{R}}}{h}, \tag{3}$$

где  $\tilde{R} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$ . Поэтому нормативное распределение

$$\tilde{E}_{\beta^1}(u) = \frac{h}{\sqrt{\lambda \tilde{R}}} \left| \int \frac{h}{\sqrt{\lambda \tilde{R}}} e^{-i\beta(AC^1 + C^1B^1)} dx \right|$$

Если учесть направленные свойства передающей антенны, положив  $\cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\theta}{\theta_0}\right)$  для главного лепестка и пренебрегая ее боковым излучением, получим окончательно

$$\tilde{E}_{\beta^1}(u) = \frac{h}{\sqrt{\lambda \tilde{R}}} \left| \int_{-R_1 \theta_0}^{R_1 \theta_0} \frac{\cos\left(\frac{\pi x}{2 R_1 \theta_0}\right)}{f(x)} e^{-i\beta(AC^1 + C^1 \beta^1)} dx \right| \quad (4)$$

**Общие формулы для диаграммы направленности приемной антенны.**

Если диаграмма приемной антенны описывается аналогичным равенством  $\cos\left(\frac{\pi \theta}{2 \theta_0}\right)$ , то при повороте ее на угол  $\theta$ , освещается часть кромки с координатами  $x_1 = R_2(\theta + \theta_0)$ ,  $x_2 = R_2(\theta - \theta_0)$ . Поэтому диаграмма направленности приемной антенны определяется равенством

$$F(\theta) = \left| \int_{\max[R_2(\theta - \theta_0), -R_1 \theta_0]}^{\min[R_2(\theta + \theta_0), R_1 \theta_0]} \cos\left(\frac{\pi x}{2 R_1 \theta_0}\right) \cos\left[\frac{\pi}{2 \theta_0} \left(\frac{x}{R_2} - \theta\right)\right] e^{-i\beta \frac{x^2 + f^2(x)}{f(x)}} dx \right| \quad (5)$$

В пределах интеграла учтено, что кромка  $\Gamma$  неравномерно возбуждается и предающей антенной.

**Расчетные формулы для примера.**

В рассмотренном уже примере ( $R_2 = 6700$  м,  $R_2 = 1600$  м,  $\lambda = 0,0273$  м) положим также, что ширина главного лепестка передающей и приемной антенны (в одну сторону) составляет  $\theta_0 = 0,767^\circ$ . Для этого случая

$$\tilde{E}_{\beta^1}(u) = 0,168h \left| \int_{-90}^{90} \frac{\cos \dots \left(\frac{\pi x}{180}\right)}{f(x)} e^{-i0,0172[x^2 + f^2(x)] - i0,0719[(x-u)^2 + f^2(x)]} \right| \quad (6)$$

$$F(\theta) = \left| \int_{\max[1600\theta - 21,4; -90]}^{\min[1600\theta + 21,4; 90]} \cos\left(\frac{\pi x}{180}\right) \cos(0,0733x - 117,3) e^{-i0,0891 \frac{[x^2 + f^2(x)]}{f(x)}} \right| \quad (7)$$

В формулах (6) и (7) все размеры в метрах, угол  $\theta$  - в градусах.

Отметим только, что при расчете интегралов (6) и (7) быстро действия ЭВМ не хватает. Фаза подынтегрального выражения изменяется настолько быстро, что требуется разбиение интеграла (6) на несколько тысяч частей. Чтобы избавиться от этого возможно периферию интеграла вычислить аналитически. Разобьем (6) следующим образом

$$J = \int_{-90}^{-x_1} + \int_{-x_1}^{x_1} + \int_{x_1}^{90}$$

Если считать, что на интервалах (90, -x) и (x, 90) функция не меняется, соответствующие интегралы можно вычислить по вкладку края, именно

$$\int_a^b f(x) e^{ip^{y(x)}} dx = \frac{1}{ip} f(x) \frac{e^{ip^{y(x)}}}{y'(x)} \Big|_a^b$$

и получить

$$\begin{aligned} \tilde{E}_{\beta^1}(u) = & 0,187 \cdot h \cdot \cos\left(\frac{\pi x_1}{2 \cdot 50}\right) e^{-i\frac{\pi}{2}} \left\{ \frac{e^{-i0,0891 [f^2(-x_1) + (x_1 + 0,808 u)^2]}}{(x_1 + 0,808 u) f(-x_1)} + \right. \\ & \left. + \frac{e^{-i0,0891 [f^2(x_1) + (x_1 - 0,808 u)^2]}}{(x_1 - 0,808 u) \cdot f(x_1)} + 0,168 \cdot h \int_{-x_1}^x dx \right\} \end{aligned}$$

При  $X=50$  оказывается достаточным делить интервал интегрирования на 1000 частей. Результаты расчетов распределения поля.

В первую очередь было рассчитано распределение поля для затенения полуплоскостью при  $h=30\text{м}$  (рис.5). Видно, что, как и следовало ожидать, распределение поля повторяет диаграмму передающей антенны.

На рис.6 приведено распределение для случая, когда

$$f(x) = \begin{cases} \sqrt{3400 - x^2} & |x| \leq 50\text{м} \\ 30 & |x| \geq 50\text{м}, \end{cases}$$

т.е. для френелевского круга (вся кромка  $\sqrt{3400 - x^2}$  возбуждается и пере излучает синфазно). Распределение  $\tilde{E}_{\beta^1}(u)$  меняется крайне резко (фокальное пятно составляет несколько десятков сантиметров) и полностью соответствует излучению синфазной возбуждающей апертуры около 19дб.

На рис.7 приведено распределение  $\tilde{E}_{\beta^1}(u)$  для

$$f(x) = \begin{cases} 30 + 13,5 \cos^2\left(\frac{\pi x}{100}\right) & |x| \leq 50 \\ 30 & |x| \geq 50 \end{cases}$$

т.е. для препятствия, центральная часть которого выше периферийной. Отметим, что этот случай обеспечивает максимум сигнала при  $u=0$  из семейства

$$f(x) = \begin{cases} 30 + A \cdot \cos^2\left(\frac{\pi x}{100}\right) & |x| \leq 50 \\ 30 & |x| \geq 50 \end{cases}$$

т.е. при  $A=13,5$  в среднем профиль препятствия ближе всего к кругу. В этом случае фокальное пятно также достаточно узко.

На рис.8 показана зависимость  $\tilde{E}_{\beta^1}(u)$  т.е. для препятствия с провалом в центре. В этом случае распределение меняется достаточно медленнее и имеет минимум по створу.

### Результаты расчетов диаграммы приемной антенны.

На рис.9 показана диаграмма направленности приемной антенны на трассе с затеняющей полуплоскостью. Пунктир с точками соответствует диаграмме в свободном пространстве  $F_0(\theta) = \cos(2,047\theta)$ ,  $\theta$  в градусах. Как видно, на высоких уровнях (вплоть до -20дб) диаграммы  $F(\theta)$  и  $F_0(\theta)$  практически совпадают.

На рис. 10 изображена диаграмма  $F(\theta)$  для препятствия, центральная часть которого совпадает с френелевским кругом. Видно, что реальная диаграмма не похожа на диаграмму в свободном пространстве и шире ее во много раз.

На ри.11 изображена диаграмма  $F(\theta)$  для случая

$$f(x) = \begin{cases} 30 + 13,5 \cos^2\left(\frac{\pi x}{100}\right) & |x| \leq 50 \\ 30 & |x| \geq 50 \end{cases}$$

Видно, что в этом случае ширина реальной диаграммы больше ширины диаграммы  $F_0(\theta)$

На рис. 12 приведена зависимость  $F(\theta)$  для

$$f(x) = \begin{cases} 50 & |x| \leq 30 \\ \sqrt{3400 - x^2} & 30 \leq |x| \leq 50 \\ 30 & |x| \geq 50 \end{cases}$$

В этом случае в реальной диаграмме  $F(\theta)$  имеется боковой лепесток, соответствующий направлению на отрезок френелевского круга, с уровнем, значительно превышающим уровень главного лепестка.

На рис 13 приведена зависимость  $F(\theta)$  для несимметричного затенения, именно

В этом случае огромный боковой лепесток имеет место естественно с одной стороны диаграммы.

**Выводы.**

Анализ и результаты расчетов убедительно показывают, что на трассе с затенением распределение поля и диаграмма приемной антенны существенно отличаются от случая открытой трассы.

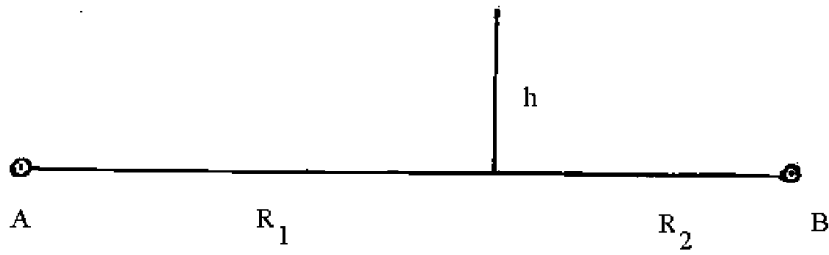


Рис. 1.

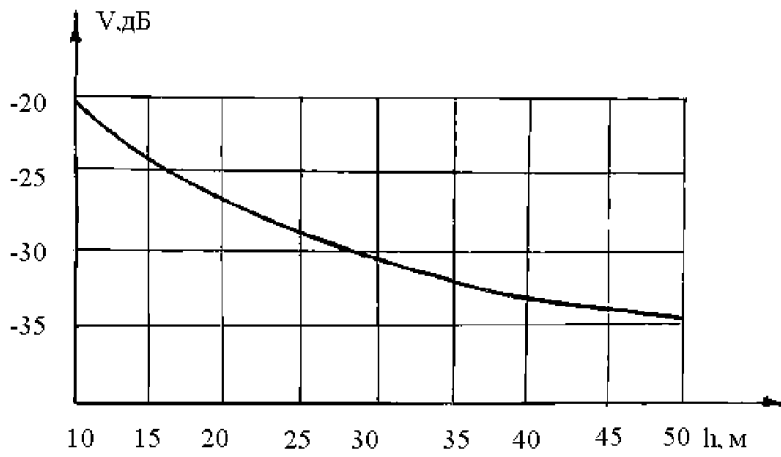


Рис.2.

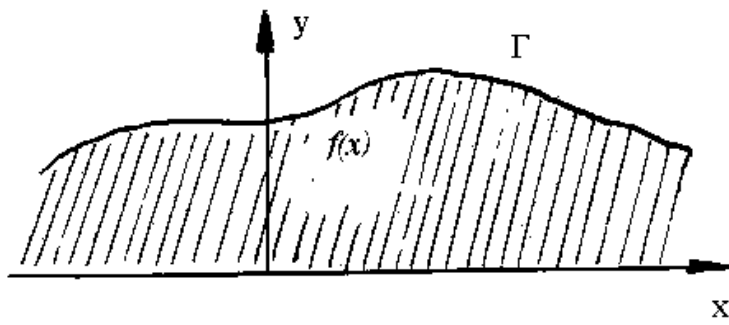


Рис3.

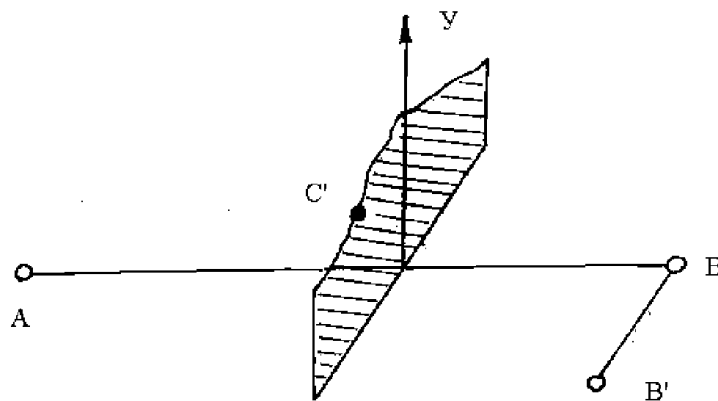


Рис. 4.

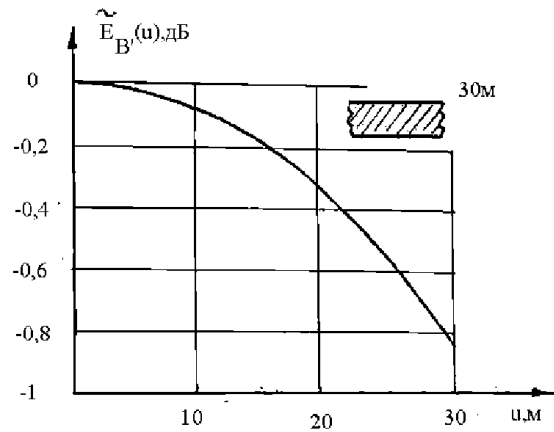


Рис.5.

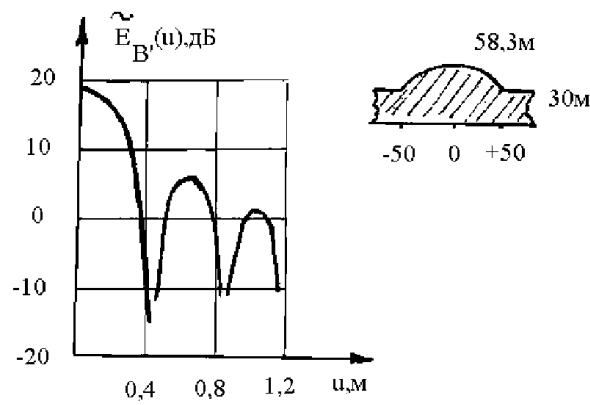


Рис.6.

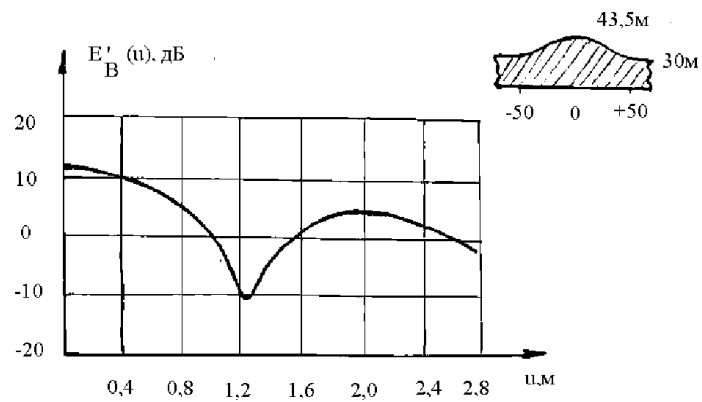


Рис.7.

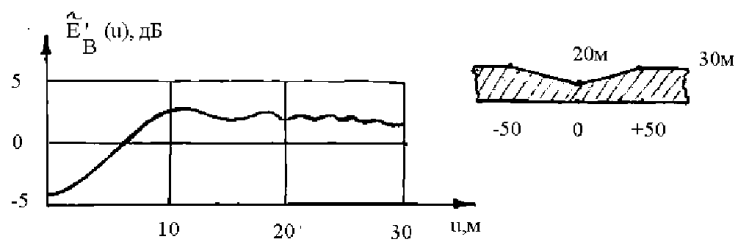


Рис.8.

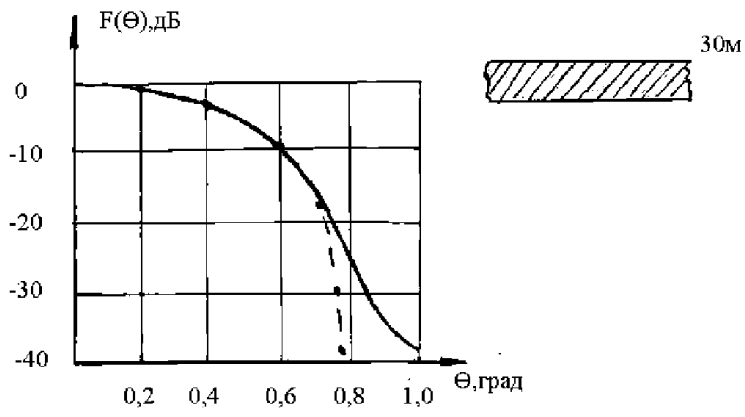


Рис.9.

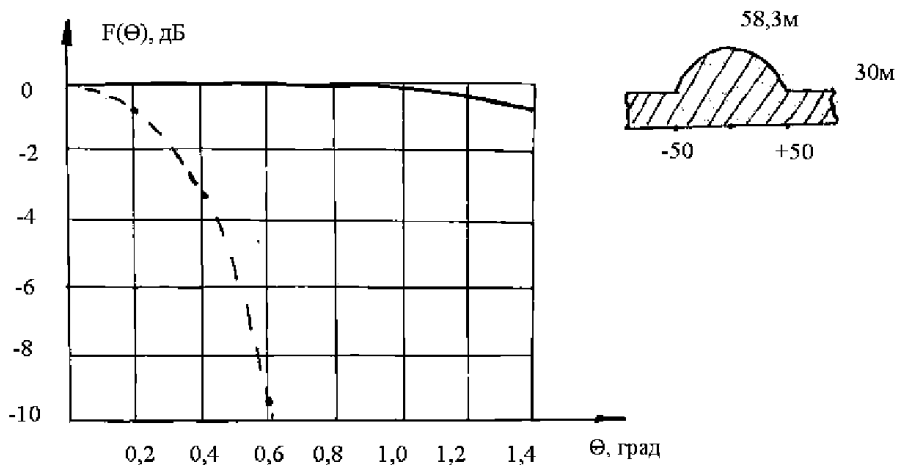


Рис.10.

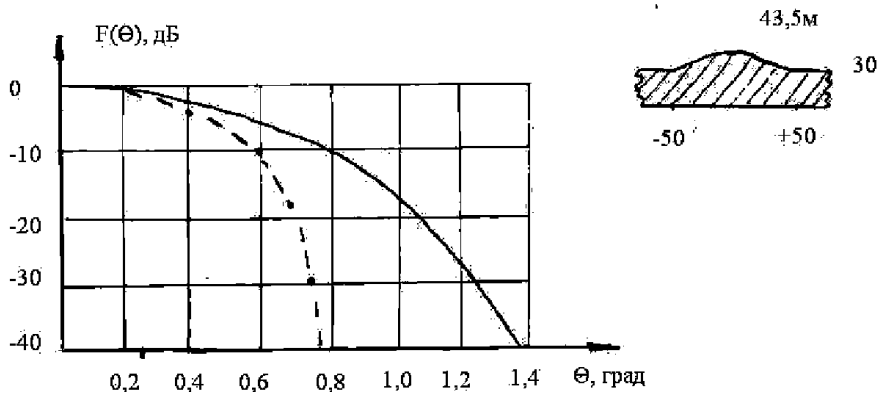


Рис.11.

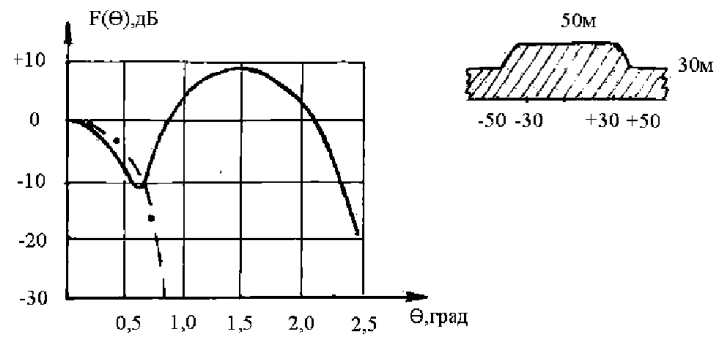


Рис.12.

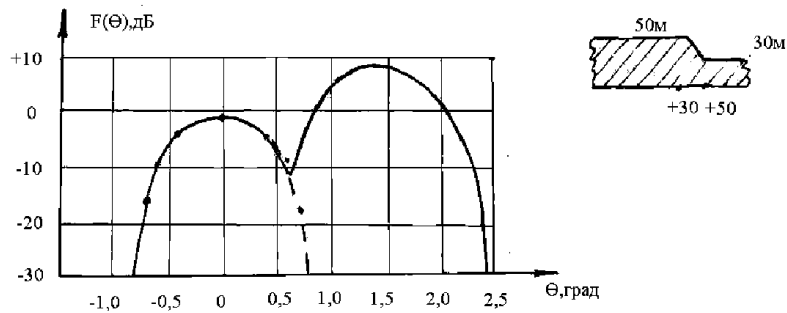


Рис.13.

## Литература:

1. Айзенберг Г.З., и др. Антенны УКВ. /Под редак. Г.З.Айзенберга .Ч.1.-М.: Связь.,1977.- 384 с.
2. Айзенберг Г.З., и др. Антенны УКВ. /Под редак. Г.З. Айзенберга Ч.2.-М.: Связь., 1977. 288с.
3. Калитеевский Н.И. Волновая оптика. –М.: Наука.,19771.-376 с.
4. Макеева М.Н. Радиорелейные линии связи.- М.: Радио и Связь.,1988.-312 с.
5. Системы радиосвязи . /Под редак.Н.И.Калашникова -М.:Р и С .,1988.-352с.
6. Мордухович Л.Г.,Степанов А.П. Системы радиосвязи.-М.:РиС., 1987.-191с.
7. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн.-М.:Сов.радио.,1972.-464с.
8. Цифровые и аналоговые системы передачи. /Под редак.В.И.Иванова.- М.: Горячая линия –Телеком.,2005.-232с.