

УДК. 621.371

## ОЦЕНКА РАЗМЕРОВ ЗОНЫ РАДИОПОКРЫТИЯ, СОЗДАВАЕМОЙ ИЗЛУЧАЮЩИМ КАБЕЛЕМ

**В. И. Мартынов**, главный специалист ОАО «Интеллект Телеком», д. т. н.; martinov@i-tc.ru

**Ключевые слова:** *излучающий кабель, радиопокрытие, плотность потока мощности, диаграмма направленности антенны.*

**Введение.** В настоящее время в нашей стране отсутствуют утвержденные Минкомсвязи РФ методики энергетического расчета систем связи (сотовой связи в тоннелях, метрополитене и т. п.), базирующихся на излучающем кабеле (ИК). Данное обстоятельство создает значительные затруднения в ходе рабочего проектирования указанных систем. Помимо отсутствия методического материала, практически нет публикаций по данному вопросу в отечественной печати. В качестве исключения можно упомянуть лишь работы [1, 2].

Авторам статьи [1] удалось весьма компактно изложить физические принципы функционирования таких систем и привести методику расчета энергетического бюджета линии для случая, когда приемник размещается в непосредственной близости от кабеля в зоне, где известно паспортное значение стандартных потерь из-за переходного затухания. Однако данная методика не позволяет рассчитать (оценить) размеры зоны радиопокрытия для случая, когда приемник находится на расстоянии, превышающем то, на котором производителем кабеля измерено паспортное значение стандартных потерь на связь (обычно 2 м).

Автор статьи [2] предпринял попытку обоснования подхода к решению задачи расчета поля ИК в протяженном сооружении с учетом конечной проводимости стенок. Тем не менее, материалы, представленные в [2], не позволяют провести реальный расчет поля кабеля. Этому не скрывает и сам автор, указывая, что «соответствующие выражения весьма громоздки и в статье не приводятся».

В то же время за рубежом существует значительное число публикаций по тематике ИК. Так, в [3–6] исследуются теоре-

тические аспекты коаксиальных излучающих систем, предлагаются соответствующие теоретические модели, к сожалению, не приспособленные для практических инженерных расчетов. Доступ к публикациям [7, 8] затруднен, поскольку они отсутствуют в отечественных библиотечных фондах. К представляющим практический интерес относится лишь публикация [9], автор которой предложил достаточно простую математическую модель ИК, базирующуюся на понятии элементарного источника рассеянного излучения, функционирование которого описывается законом Ламберта. В [9] приводится выражение для оценки мощности, наводимой в полуволновом вибраторе от ИК. Однако, указанное выражение дано без вывода, содержит неизвестный множитель, принято допущение о бесконечной длине кабеля, а собственно методика оценки размеров зоны радиопокрытия отсутствует.

Учитывая изложенное, можно считать, что разработка методики оценки размеров зоны радиопокрытия, создаваемой ИК, представляет интерес для связистов.

**Типы излучающего кабеля.** ИК в конструктивном отношении представляет собой коаксиальный кабель, во внешнем проводнике которого имеются отверстия, обеспечивающие проникновение электромагнитного поля во внешнее по отношению к кабелю пространство (передача) и в обратном направлении (прием). Размеры и взаимное расположение отверстий определяют механизм распространения электромагнитной энергии по кабелю. Существуют два таких механизма, и, соответственно, кабели, реализующие их, делятся на два типа:

- кабель с поверхностной волной;
- кабель с излучаемой волной.

В кабеле с поверхностной волной внешние электромагнитные поля, создаваемые в свободном пространстве, прилегают к кабелю (распространяются в условном цилиндре) и не излучаются. Излучение электромагнитной энергии в реальных условиях обусловлено рассеянием на объектах, расположенных в непосредственной близости от кабеля (например — рассеяние от стены, по которой проложен кабель).

В кабеле с излучаемой волной электромагнитная энергия излучается даже в свободном пространстве. В дальнейшем для обозначения обоих типов кабеля будем использовать объединенный термин «излучающий кабель».

*Расчет размеров зоны радиопокрытия*, создаваемой ИК, может быть проведен лишь на основе разработки математически строгих моделей, описывающих механизм распространения электромагнитной энергии по кабелю и излучения ее в пространство. Зачастую такие модели могут быть построены лишь для каждой конкретной ситуации, поскольку в них необходимо учитывать конструкцию конкретного кабеля и характеристики конкретных сооружений, в которых он проложен. Реально проектировщик систем связи лишен возможности построения таких моделей. Кроме того, отсутствие подобных моделей может быть скомпенсировано проведением натурных измерений в сооружениях, где предполагается построение системы связи, базирующейся на ИК.

Вместе с тем, *оценка размеров зоны радиопокрытия*, создаваемой ИК, необходима на этапе рабочего проектирования. Не обладая точностью, которой характеризуется расчет, она в то же время дает представление о размерах зоны радиопокрытия и позволяет задать предварительные требования к оборудованию. При проведении подобной оценки проектировщик может использовать лишь исходные данные, предоставляемые производителем ИК.

**Анализ исходных данных.** В распоряжении проектировщика систем связи имеются следующие исходные данные по ИК:

Линейное затухание  $\alpha_f$  кабеля на частоте  $f$ :

$$\alpha_f = 10 \lg \frac{P_{f_{cab}}(l)}{P_{f_{cab}}(l + l_{det})}, \text{ дБ/}l_{det}, \quad (1)$$

где  $\alpha_f$  — линейное затухание кабеля на частоте  $f$ ;  $P_{f_{cab}}(l)$  — проходная мощность в сечении кабеля, удаленном от генератора на расстояние  $l$ ;  $P_{f_{cab}}(l + l_{det})$  — проходная мощность в сечении кабеля, удаленном от генератора на расстояние  $(l + l_{det})$ ;  $l_{det}$  — расстояние, указываемое производителем кабеля (обычно составляющее 100 м); в этом случае  $\alpha_f$  измеряется в дБ/100 м.

Производитель указывает значения  $\alpha_f$  на рабочих частотах кабеля.

Стандартные потери из-за переходного затухания  $N_f(D_{det})$  для кабеля на частоте  $f$ :

$$N_f(D_{det}) = 10 \lg \frac{P_{f_{cab}}}{P_{f_{ant}}(D_{det})}, \text{ дБ}, \quad (2)$$

где  $P_{f_{cab}}$  — мощность в кабеле;  $P_{f_{ant}}(D_{det})$  — мощность, наводимая в полуволновом вибраторе, ориентированном параллельно оси кабеля, удаленном от нее на расстояние  $D_{det}$ . Производитель указывает: расстояние  $D_{det}$  кабеля, обычно составляющее 2 м; по два значения  $N_f$  на каждой частоте —  $N_f(50\%)$  и  $N_f(95\%)$ . Объясняется это тем, что электромагнитное поле очень неравномерно по длине кабеля и, следовательно, излучающая способность кабеля по его длине также меняется, причем в достаточно широком диапазоне.

Неравномерность поля приводит к изменению значения  $N_f$ , причем закономерность, аналитически описывающую данную неравномерность, выявить весьма сложно, а применять при проектировании систем связи еще труднее. Поэтому потери из-за переходного затухания рассматриваются как случайная величина. Значение этой величины не может быть определено однозначно, поэтому производитель кабеля указывает выраженную в процентном отношении вероятность события, заключающегося в том, что величина  $N_f$  примет значение не больше указанного. Проектировщику систем связи есть смысл ориентироваться на  $N_f(95\%)$ , поскольку данное значение гарантируется в большей степени. Производитель указывает значения  $N_f$  на рабочих частотах кабеля.

Отметим, что приводимая производителем кабеля величина  $N_f$  не зависит от расстояния между точкой подключения к кабелю генератора и точкой проведения измерений (точкой проекции центра полуволнового вибратора на ось кабеля), так как является усредненной по большому количеству измерений величиной. Поэтому из соображений удобства в дальнейшем будем полагать, что  $N_f$  определена в точке, проекция которой на ось кабеля совпадает с точкой подключения генератора. Это избавит от необходимости учета линейного затухания в кабеле, тем более, что подобный учет непродуктивен из-за отсутствия зависимости  $N_f$  от расстояния между точками измерения и подключения генератора. В дальнейшем для упрощения обозначений будем опускать индекс  $f$  при  $N$ , так как приводимые ниже расчеты справедливы при любой частоте.

**Математическое моделирование участка радиолнии «излучающий кабель — приемная антенна».** Воспользуемся предположением, сделанным в [9], о том, что ИК представляет собой цепочку, образованную бесконечно большим количеством элементарных источников рассеянного излучения, функционирование каждого из которых описывается законом Ламберта. Закон сформулирован применительно к оптике и в настоящее время рассматривается как схема идеального рассеяния света. Согласно данному закону, яркость рассеивающей свет поверхности одинакова во всех направлениях и сила света, излучаемая плоской рассеивающей площадкой  $\Delta S$  в каком-либо направлении, зависит от угла  $\beta$  между этим направлением и перпендикуляром к  $\Delta S$ , т.е.  $I_a = I_0 \cos \beta$ . Данное выражение означает, что сила света плоской поверхности  $I_0$  максимальна по перпендикуляру к ней и, убывая с увеличением  $\beta$ , становится равной нулю в касательных к поверхности направлениях.

Если под площадкой понимать малый участок поверхности ИК, а вместо света рассматривать электромагнитную волну, излучаемую кабелем, то плотность потока мощности, излучаемой под углом  $\theta$  к поверхности площадки, составит

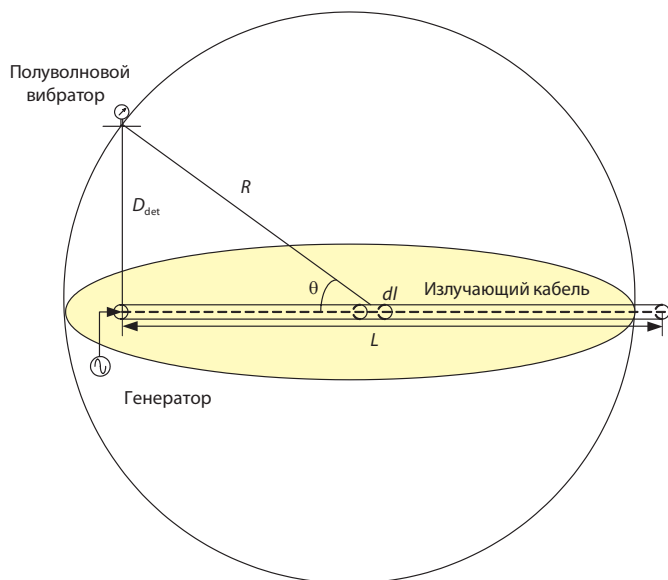
$$W \cos \beta = W \sin \left( \frac{\pi}{2} - \beta \right) = W \sin \theta,$$

где  $W$  — плотность потока мощности в направлении, перпендикулярном площадке;  $\theta$  — угол визирования на площадку.

Из дальнейшего изложения будет видно, что диаграмма направленности (ДН) по мощности элементарного источника может быть задана не только законом Ламберта.

Определим плотность потока мощности, создаваемого ИК конечной длины  $L$ , в локальной области пространства (точке), удаленной от оси кабеля на расстояние  $D_{det}$ . При проведении расчетов используем рисунок, представленный ниже.

Выделим элементарный участок кабеля длиной  $dl$ , соответствующий элементарному источнику рассеянного излучения. По причине, указанной при обсуждении исходных



данных, будем полагать, что мощность, излучаемая элементарным участком в пространство, не зависит от удаленности участка от точки подключения генератора. Мощность, подводимую от генератора к ИК, обозначим через  $P_{\text{ген}}$ , а излучаемую в пространство часть этой мощности — через  $kP_{\text{ген}}$ . Значение коэффициента  $k$  ( $k < 1$ ) зависит от конструктивных особенностей кабеля и подлежит определению. Тогда мощность  $dp$ , излучаемая в пространство элементарным участком кабеля:

$$dp = \frac{1}{L} k P_{\text{ген}} dl. \quad (3)$$

Для нахождения плотности потока мощности  $dp_{\theta}$ , излучаемой элементарным участком в направлении визирования  $\theta$  на расстоянии  $R$ , рассчитаем площадь поверхности  $S$ , задаваемой соотношением Ламберта. При этом воспользуемся сферической системой координат, в центре которой поместим элементарный участок. При расчете используем соотношение для определения площади  $dS$  элементарной площадки:

$$dS = R^2 \sin \theta d\theta d\alpha,$$

где  $\theta = \overline{0, \pi}$ ;  $\alpha = \overline{0, 2\pi}$ .

Следовательно,

$$\begin{aligned} S &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} R^2 (\sin \theta) (\sin \theta) d\theta d\alpha = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} R^2 (\sin^2 \theta) d\theta d\alpha = \\ &= \int_0^{2\pi} R^2 \left( \frac{\theta}{2} - \frac{1}{4} \sin 2\theta \right)_{\theta=0, \pi} d\alpha = \int_0^{2\pi} R^2 \left( \frac{\pi}{2} - \frac{1}{4} \sin 2\pi - 0 + 0 \right) d\alpha = \\ &= \int_0^{2\pi} R^2 \frac{\pi}{2} d\alpha = R^2 2\pi \frac{\pi}{2} = R^2 \pi^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Плотность потока мощности, излучаемой элементарным источником в направлении визирования  $\theta$  на расстоянии  $R$ , выразится в виде:

$$dp_{\theta} = \frac{1}{L} \frac{k P_{\text{ген}}}{R^2 \pi^2} \sin \theta dl. \quad (5)$$

Тогда плотность потока мощности  $P^*$ , излучаемой всей совокупностью элементарных источников (всем кабелем) на расстоянии  $R$ , составит:

$$\begin{aligned} P^* &= \int_0^L \int_0^{\pi} \frac{k P_{\text{ген}} \sin \theta}{L \pi^2 R^2} d\theta dl = \frac{k P_{\text{ген}}}{L \pi^2 R^2} \int_0^L \int_0^{\pi} (\sin \theta) d\theta dl = \\ &= \frac{k P_{\text{ген}}}{L \pi^2 R^2} \int_0^L (-\cos \theta)_{\theta=0, \pi} dl = \frac{2k P_{\text{ген}}}{\pi^2 R^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Определим мощность  $P_{\text{ant}}(D_{\text{det}})$ , наводимую в симметричном полуволновом вибраторе, удаленном от точки подключения генератора к кабелю на расстояние  $D_{\text{det}}$ :

$$P_{\text{ant}}(D_{\text{det}}) = \int_0^{\pi} f(\theta) S_3 P^* d\theta, \quad (7)$$

где  $f(\theta)$  — ДН приемной антенны (полуволнового вибратора) по мощности;  $S_3$  — эффективная площадь антенны.

Для полуволнового вибратора ДН определяется в виде:

$$f(\theta) = 1,64 f^*(\theta), \quad (8)$$

где  $f^*(\theta)$  — нормированная ДН полуволнового вибратора по мощности; 1,64 — коэффициент направленного действия полуволнового вибратора по отношению к изотропной антенне.

В свою очередь, нормированная ДН выражается в виде:

$$f^*(\theta) = \frac{\cos^2 \left( \frac{\pi}{2} \cos \theta \right)}{\sin^2 \theta}. \quad (9)$$

Для величины  $S_3$  справедливо соотношение:

$$S_3 = \frac{\lambda^2}{4\pi}. \quad (10)$$

Тогда мощность  $P_{\text{ant}}(D_{\text{det}})$ , наводимая в симметричном полуволновом вибраторе, удаленном от точки подключения генератора к кабелю на расстояние  $D_{\text{det}}$ , составит:

$$P_{\text{ant}}(D_{\text{det}}) = \int_0^{\pi} \left[ \frac{2k P_{\text{ген}}}{\pi^2 R^2} \right] \left[ \frac{\lambda^2}{4\pi} \right] 1,64 \frac{\cos^2 \left( \frac{\pi}{2} \cos \theta \right)}{\sin^2 \theta} d\theta. \quad (11)$$

Из рисунка следует связь между  $R$  и  $D_{\text{det}}$ :

$$R = \frac{D_{\text{det}}}{\sin \theta}. \quad (12)$$

Тогда

$$\begin{aligned} P_{\text{ant}}(D_{\text{det}}) &= \int_0^{\pi} \left[ \frac{2k P_{\text{ген}} \sin^2 \theta}{\pi^2 D_{\text{det}}^2} \right] \left[ \frac{\lambda^2}{4\pi} \right] 1,64 \frac{\cos^2 \left( \frac{\pi}{2} \cos \theta \right)}{\sin^2 \theta} d\theta = \\ &= \int_0^{\pi} \left[ \frac{k P_{\text{ген}}}{\pi^3 D_{\text{det}}^2} \right] \left[ 0,82 \lambda^2 \cos^2 \left( \frac{\pi}{2} \cos \theta \right) \right] d\theta. \end{aligned} \quad (13)$$

Используя соотношение (13), определим коэффициент  $k$ . С учетом (13) стандартные потери из-за переходного затухания для кабеля  $N(D_{\text{det}})$  составят:

$$\begin{aligned} N(D_{\text{det}}) &= 10 \lg \frac{P_{\text{ген}}}{P_{\text{ant}}(D_{\text{det}})} = 10 \lg \frac{\pi^2 D_{\text{det}}^2 P_{\text{ген}}}{0,82 \lambda^2 k P_{\text{ген}} \int_0^{\pi} \cos^2 \left( \frac{\pi}{2} \cos \theta \right) d\theta} = \\ &= 10 \lg \frac{\pi^2 D_{\text{det}}^2}{0,82 \lambda^2 k \int_0^{\pi} \cos^2 \left( \frac{\pi}{2} \cos \theta \right) d\theta}. \end{aligned}$$

Откуда значение  $k$  выразится в виде:

$$k = \frac{\pi^2 D_{\text{det}}^2}{0,82\lambda^2 10^{0,1N(D_{\text{det}})} \int_0^\pi \cos^2\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta\right) d\theta}. \quad (14)$$

**Оценка размеров зоны радиопокрытия.** Соотношение (14) позволяет определить стандартные потери из-за переходного затухания для кабеля при любом расстоянии  $D$  между осью кабеля и приемной антенной  $N(D)$ :

$$\begin{aligned} N(D) &= 10 \lg \frac{\pi^2 D^2}{0,82\lambda^2 \int_0^\pi \cos^2\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta\right) d\theta} \times \\ &\times \frac{0,82\lambda^2 10^{0,1N(D_{\text{det}})} \int_0^\pi \cos^2\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta\right) d\theta}{\pi^2 D_{\text{det}}^2} = \\ &= 10 \lg \frac{10^{0,1N(D_{\text{det}})} D^2}{D_{\text{det}}^2} = 10 \lg \left(\frac{D}{D_{\text{det}}}\right)^2 + 10 \lg 10^{0,1N(D_{\text{det}})} = \\ &= 20 \lg \left(\frac{D}{D_{\text{det}}}\right) + N(D_{\text{det}}). \end{aligned} \quad (15)$$

Зная выражение (15), можно рассчитать мощность сигнала  $M$  на входе приемника:

$$M = P_{\text{пер}} - \alpha l - N(D_{\text{det}}) - 20 \lg \left(\frac{D}{D_{\text{det}}}\right) + K_{\text{пр}}^*, \quad (16)$$

где  $P_{\text{пер}}$  — мощность передатчика, дБ (величина положительная);  $\alpha l$  — линейное затухание в кабеле на расстоянии  $l$  от места подключения передатчика (величина положительная);  $K_{\text{пр}}$  — коэффициент усиления приемной антенны относительно полуволнового вибратора, дБ. При использовании четвертьволнового вибратора  $K_{\text{пр}}^* = -3$  дБ.

Зная чувствительность приемника  $P_{\text{пр}}$  и рассчитав в соответствии с выражением (16) мощность на входе приемника  $M$ , можно сделать вывод о том, где находится радиоприемник:

- если  $M > P_{\text{пр}}$ , то приемник расположен в зоне радиопокрытия;
- если  $M < P_{\text{пр}}$ , то — вне зоны радиопокрытия.

**Пример оценки.** Задано:  $P_{\text{пер}} = 0$  дБм;  $P_{\text{пр}} = -100$  дБм;  $K_{\text{пр}}^* = -3$  дБ;  $\alpha = 3$  дБ/100 м;  $L = 65$  дБ (при  $D_{\text{det}} = 2$  м).

Пусть приемник находится в точке, удаленной от передатчика (по оси кабеля) на расстояние  $l = 300$  м, а от оси кабеля — на 20 м. Тогда мощность на входе приемника:

$$M = 0 - 3 - 3 \cdot 3 - 65 - 20 \lg \frac{20}{2} = -97 \text{ дБм.}$$

Так как  $-97 > -100$ , то приемник находится в зоне радиопокрытия.

Пусть приемник расположен в точке, удаленной от передатчика (по оси кабеля) на расстояние  $l = 200$  м, а от оси кабеля — на 50 м. Тогда мощность на входе приемника:

$$M = 0 - 3 - 3 \cdot 2 - 65 - 20 \lg \frac{50}{2} = -102 \text{ дБм.}$$

Поскольку  $-102 < -100$ , то приемник находится вне зоны радиопокрытия.

**Анализ полученных результатов.** Особенностью разработанной методики оценки размеров зоны радиопокрытия, базирующейся на выражении (15), является отсутствие учета:

- параметров сооружения, в котором проложен ИК;
- фазовых соотношений между электромагнитными волнами, излучаемыми различными элементарными участками кабеля;
- поляризации электромагнитных волн;
- способов формирования и обработки сигналов в радиолинии.

Указанные особенности, связанные с характером имеющихся в распоряжении проектировщика исходных данных по ИК, определили точность получаемых результатов. Проведенные экспериментальные измерения с ИК различных типов и марок показали, что разработанная методика может быть признана удовлетворительной в случае, если расстояние между ИК и приемной антенной не превышает 100—150 м. Данное обстоятельство налагает запрет на применение предлагаемой методики при расчете максимального удаления приемной антенны от ИК.

Как правило, системы связи на основе ИК предназначены для обеспечения радиосвязи в сооружениях, линейные размеры которых таковы, что расстояние между приемником и ИК при любой топологии его прокладки существенно меньше 100 м, поэтому методика может применяться при строительстве систем связи в метрополитене, тоннелях, лифтовых шахтах, на подземных автостоянках, предприятиях горной и угольной промышленности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Павлов А. А., Дорезюк Н. И., Серегин И. А. Без «порочащих связей». Излучающий кабель: параметры, виды, конструкция, особенности//Мир связи и информации, Connect. — 1997. — № 5. — С. 76.
2. Мущенко В. И. Методика анализа протяженных излучающих структур типа «излучающий кабель» в присутствии полупроводящих стенок//Радиотехника. — 2001. — № 9. — С. 106—108.
3. Wait J. R., Hill D. A. On the Electromagnetic Field of a Dielectric Coated Coaxial Cable with an Interrupted Shield//IEEE Transactions on Antennas and Propagation. — 1975. — Vol.23. — № 4.
4. Chang D. C. Theory on Small Radiating Apertures in the Outer Sheath of a Coaxial Cable//IEEE Transactions on Antennas and Propagation. — 1978. — Vol.26. — № 5.
5. Kiang J. F. Analysis of Linear Coaxial Antennas//IEEE Transactions on Antennas and Propagation. — 1998. — Vol.46. — № 5.
6. Zhang Y. P. Indoor Radiated-Mode Leaky Feeder Propagation at 2.0 GHz//IEEE Transactions on Vehicular Technology. — 2001. — Vol.50. — № 2.
7. Delogne P. Leaky Feeders and Subsurface Radio Communications/U. K., Peregrinus. — 1982.
8. Levisse A. Leaky or Radiating? Radiation Mechanisms of Radiating Cables and Leaky Feeders — “Channel Tunnel Applications”//International Wire and Cable Symposium Proceedings. — 1992.
9. Morgan S. P. Prediction of indoor wireless coverage by leaky coaxial cable using ray tracing//IEEE Trans Veh. Tech. — Nov. 1999. — Vol. 48 (6). — P. 2005—2014.

Получено 07.12.09