

УДК 621.396.671

Физико-технические проблемы создания широкополосных приземных передающих антенн длинноволнового диапазона

Владимир И. Готовко*
ФГУП ЦКБ "Геофизика",
Киренского 89, Красноярск, 660041,
Россия

Получена 10.01.2010, окончательный вариант 10.02.2010, принята к печати 10.03.2010

Рассмотрены особенности построения радиолинии связи низкочастотного диапазона, в том числе и для северных широт, возможность использования в качестве передающей антенны мобильных станций связи кабельных антенн приземного типа, приведена методика расчета ее параметров и способ дистанционного управления длиной антенного полотна.

Ключевые слова: радиолинии связи, передающие антенны, кабельные антенны, дистанционное управление.

Мобильные быстроразвертываемые станции связи длинноволнового диапазона радиоволн являются эффективным средством организации оперативной надежной связи между корреспондентами с переменными местами их дислокации. При этом не накладываются практически никакие ограничения на рельеф местности для размещения радиостанций, сезонные и климатические условия организации связи, что очень важно, например, для подразделений МЧС или организации связи в северных широтах, где гарантированную связь на других частотах организовать просто невозможно.

Существующие "общепринятые" системы мобильной связи строятся в основном на использовании электромагнитных колебаний коротковолнового диапазона (3–30 МГц) вследствие того, что радиосредства этого диапазона, в том числе и антенны, относительно небольшие, дешевые и удобные в эксплуатации. Но при этом необходимо учитывать, что присущие КВ-диапазону радиоволн физические особенности распространения электромагнитных колебаний — ионосферной волной с неоднократными отражениями от ионосферы и от земной поверхности — не позволяют обеспечить гарантированный канал связи, так как его эффективность определяется стабильностью ионосферы, ее суточными и сезонными изменениями. Слой F_2 , "ответственный" за отражение КВ-волн от ионосферы в течение суток, тем более года, крайне неустойчив, а в полярных широтах время от времени возникают характерные для этих широт непрогнозируемые сильно ионизированные "спорадические слои" E_s [1, 2].

Общим недостатком КВ-радиолиний является также наличие на расстояниях 50 ... 150 км зон неустойчивой связи ("зон молчания"), возникающих за пределами распространения "земной (дифракционной) волны" и до начала действия "отраженной (пространственной) волны". На больших дальностях необходимо учитывать еще и многолучевость распространения радиоволн, приводящую к фазовым и амплитудным искажениям и, в конце концов, к неприему сигнала на обширных территориях.

*geofizika@kras.ru

Поэтому создание устойчивых каналов связи, свободных от основных недостатков КВ-диапазона, является обоснованной задачей. Низкочастотный (НЧ) диапазон радиоволн (30...300 кГц) позволяет обеспечить, вследствие относительно больших длин волн ($\lambda \approx 1...10$ км), устойчивое электромагнитное покрытие "земной волной", в зависимости от конкретных значений рабочих частот и условий распространения, достаточно большие расстояния. Так, для частот 200...300 кГц дальность действия "земной волной" не превысит 600...800 км, для частот 150 кГц обеспечивается до 1000 км, для частот 30...60 кГц можно гарантированно во всех условиях получить 1200...1600 км. Связь на большие расстояния (2000 км и далее) обеспечивается стабильной "ионосферной волной", формируемой устойчивыми ионосферными слоями D и E . Таким образом осуществляется "непрерывность" электромагнитного поля по всей трассе распространения сигнала, что исключает наличие в НЧ-диапазоне "зон молчания" и многолучевости [3].

Учитывая известную зависимость эффективности (излучаемой мощности P_{Σ}) антенны от ее геометрических размеров и длины электромагнитной волны λ [4]:

$$P_{\Sigma} = P_0 \cdot G = P_0 \frac{1600}{R_{ex}} \left(\frac{h_D}{\lambda} \right)^2, \quad (1)$$

где P_0 — мощность, подводимая к антенне, G , h_D и R_{ex} — коэффициент усиления, действующая высота и активное входное сопротивление антенны соответственно, при проектировании радиолиний в этом диапазоне наибольшую проблему представляет собой создание передающих антенн. Для обеспечения требуемой эффективности излучения геометрические размеры передающих антенн необходимо оптимизировать с длиной излучаемой электромагнитной волны $h_D \approx \frac{\lambda}{4}$, а это сотни метров. Таким образом, передающие антенны в низкочастотном диапазоне радиоволн представляют собой в основном стационарные антенно-мачтовые устройства, громоздкие и дорогостоящие инженерные сооружения, практически исключающие применение рассматриваемых радиосредств в мобильных целях.

В северных широтах все существенно усложняется, т.к. в условиях вечной мерзлоты строительство, обслуживание и защита антенно-мачтовых устройств от действия крайне низких температур, шквальных порывов ветра, обильных снегопадов представляют собой комплекс сложнейших проблем.

Для повышения механической устойчивости от внешних климатических воздействий предлагается применить в качестве передающих антенн кабельные антенны приземного типа. Эти антенны значительно дешевле и проще в эксплуатации. Антенна представляет собой отрезки изолированного кабеля, линейно разложенные на поверхности Земли в противоположных от передатчика направлениях в виде симметричного или несимметричного диполей. Длина антенного полотна, в зависимости от выбранного диапазона частот, может изменяться от 300 до 1500 м. Размещенная на индивидуальных катушках антенна легко транспортируется и обеспечивает высокую мобильность для станций связи, особенно в интересах МЧС. Антенна обладает высокой ветроустойчивостью, стойкостью к грозovým разрядам молний, не накладывает практически никаких ограничений на условия развертывания (ее можно развернуть там, где пройдет человек).

Высокие эксплуатационные свойства антенны, обеспечиваемые простотой и ее надежностью, отсутствием конструктивно жестких металлических элементов, минимальным временем развертывания (свертывания) в полевых условиях, делают кабельные антенны незаменимыми в качестве передающих антенн мобильных комплексов [5].

Для расчетов параметров антенны представим ее в виде отрезка длинной линии с по-

терями в форме изолированной коаксиальной линии передачи с воздушным диэлектриком, причем токопроводящий провод антенны является внутренним проводником линии, поверхность земли — ее внешним проводником, а радиус воздушной изоляции равен высоте расположения приземной антенны.

Входное сопротивление $Z_{\text{вх}}$ [6] симметричной приземной незаземленной антенны с длиной плеча ℓ и количеством проводов в плече N определяется как

$$Z_{\text{вх}} = R_{\text{вх}} + jX_{\text{вх}} = \frac{2Z_{\text{вх},1}}{N} = \frac{2W}{N \cdot \text{th } \gamma \ell}, \quad (2)$$

где $R_{\text{вх}}$ и $X_{\text{вх}}$ — активное и реактивное значения входного сопротивления антенны; $Z_{\text{вх}}$ — входное сопротивление однолучевой антенны; $\gamma = jk_{\text{в}}\sqrt{\varepsilon_2^*} \sqrt{\frac{Y_1}{Y_2}}$ — постоянная распространения, 1/м; $W = -\frac{60}{\sqrt{\varepsilon_2^*}} \sqrt{Y_1 \cdot Y_2}$ — волновое сопротивление провода, Ом; $Y_1 = \left(\ln j \frac{k_2 \cdot a_1 \cdot \chi}{2} \right)$ — параметр; $Y_2 = \left(\ln j \frac{k_2 \cdot a_3 \cdot \chi}{2} - \varepsilon_2^* \ln \frac{a_3}{a_2} - \frac{\varepsilon_2^*}{\varepsilon_n^*} \ln \frac{a_2}{a_1} \right)$ — параметр; $k_{\text{в}} = \frac{2\pi}{\lambda}$, $k_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_2^*}$ — волновые числа воздуха и грунта, 1/м; ε_2 , $\varepsilon_2^* = \varepsilon_2 - j60\lambda\sigma_2$ — относительная и комплексная диэлектрические проницаемости грунта; ε_n , $\varepsilon_n^* = \varepsilon_2 - j60\lambda\sigma_n$ — относительная и комплексная диэлектрические проницаемости изоляции провода; σ_2 , σ_n — удельные проводимости грунта и изоляции провода, Сим/м; a_1 , a_2 — радиусы токопровода и изоляции провода, м; a_3 — высота расположения провода над землей, м; $\chi = 1.781$ — постоянная.

Действующая высота рассматриваемой антенны в направлении максимума излучения определяется как

$$h_D = \frac{2\gamma \cdot \cos(\arctg |\sqrt{\varepsilon_2^*}|) \cdot [\cos(k_{\text{в}}\ell) - \cos(\gamma\ell)]}{(\gamma^2 - k_{\text{в}}^2) \sin(\gamma\ell)}. \quad (3)$$

Выражения (1)–(3) позволяют оценить значения коэффициента усиления антенны и излучаемой мощности для кабельных антенн разной длины, различных условий размещения и геоэлектрических параметров антенных площадок.

На рис. 1 и 2 приведены теоретические и экспериментальные [7] графики зависимости от частоты входного сопротивления и коэффициентов усиления трехлучевого симметричного диполя длиной $L_1 = 300$ м, $L_2 = 450$ м, $L_3 = 900$ м и $L_4 = 1350$ м, выполненных из высокочастотного кабеля, развернутого на грунте со средним значением удельного электросопротивления 100 Ом/м.

Зависимость коэффициента усиления каждой антенны от частоты имеет сложный характер и, несмотря на их (антенн) достаточную широкополосность, не позволяет обеспечить одной антенной эффективную эксплуатацию во всем требуемом диапазоне частот. Следовательно, непрерывная эффективная работа во всем частотном диапазоне возможна только на антеннах разной длины. Зависимость входного сопротивления антенны от частоты показывает высокий диапазон технических требований, предъявляемых к аппаратуре для обеспечения оптимального согласования передатчика и антенн, особенно для широкополосных сигналов.

Таким образом, требуемая дальность действия определяет частотный диапазон и геометрический размер (длину) передающей антенны.

Необходимо отметить, что приземные антенны вследствие близости их расположения к полупроводящему грунту обладают достаточно низкими коэффициентами усиления ($G \approx 10^{-3}$) и требуют для обеспечения приемлемых дальностей действия больших подводимых мощностей — десятки кВт. Для уменьшения потребляемых в НЧ-каналах связи

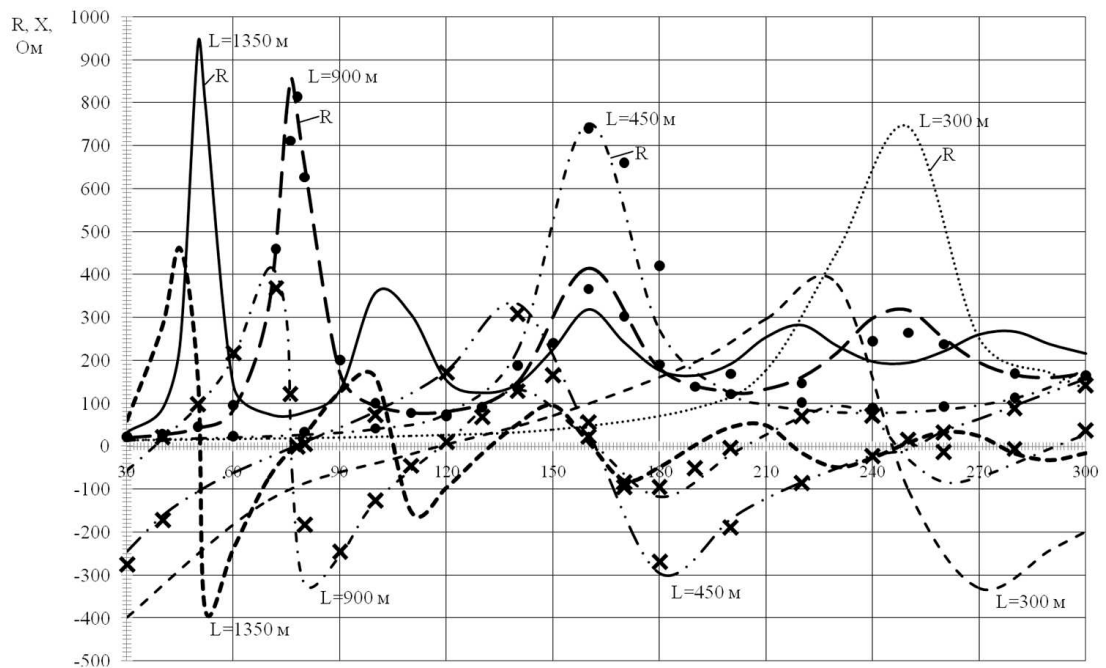


Рис. 1. Зависимость активного R и реактивного X значений входного сопротивления антенн от частоты, кГц, где \bullet и $+$ — экспериментальные данные

мощностей передача информации осуществляется специальными широкополосными сигналами, модулированными определенным порядком (например, по типу относительной фазовой манипуляции), которые позволяют на приемном конце обрабатывать по известному алгоритму сигналы значительно ниже уровня шумов [8]. Кроме того, широкополосные сигналы характеризуются отсутствием многолучевости и ярко выраженных интерференционных минимумов.

В некоторых случаях для оперативной организации устойчивых каналов связи на различные дальности действия в меридианном или широтном направлениях в сложной помеховой обстановке необходимо варьировать рабочими частотами в достаточно широком диапазоне частот без понижения эффективности излучения. Для этого требуется обеспечить изменение (увеличение или уменьшение) длины полотна антенны. Вручную это приводит, учитывая линейные размеры антенны, к большим временным издержкам, лишая тем самым канал связи необходимой оперативности.

Существуют различные варианты расширения диапазона рабочих частот антенны. Например, с использованием катушек индуктивностей, включаемых последовательно в полотно антенны [9], или с использованием специальных электронных устройств — антенных коммутаторов [10, 11].

Практическое применение получил метод изменения длины антенного полотна с использованием коммутаторов плеча антенны (КПА) [12].

На рис. 3 приведен вариант построения симметричной антенны переменной длины.

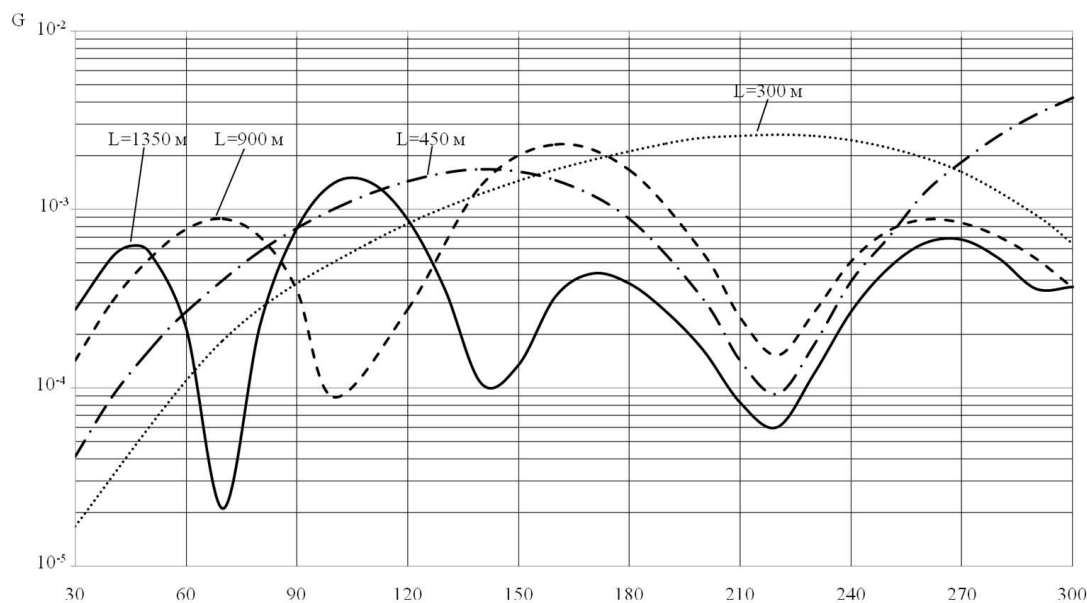


Рис. 2. Зависимость коэффициента усиления антенн от частоты, кГц

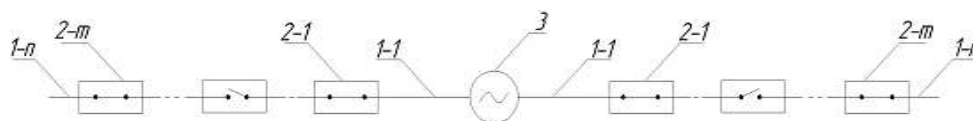


Рис. 3. Схематическое изображение симметричной антенны переменной длины

Антенна переменной длины состоит из отдельных n отрезков кабеля $1-1 \dots 1-n$, разложенных последовательно по поверхности земли (количество n отрезков соответствует числу поддиапазонов рабочего диапазона частот). Механически и электрически отрезки кабеля соединяются друг с другом КПА $2-1 \dots 2-m$, представляющими собой электронные "замыкатели-размыкатели", дистанционно управляемыми по антенному кабелю устройством управления передатчика 3 .

Каждый КПА снабжен индивидуальным устройством декодирования сигналов управления на "размыкание" или "замыкание" коммутатора. КПА в "замкнутом состоянии" вместе с соответствующими отрезками кабеля образуют необходимую длину антенного полотна. Образующаяся таким образом рабочая длина проводника антенны удовлетворяет требованию оптимальной эффективности излучения.

На рис. 4 приведена структурная схема КПА, где $БП$ — блок питания, $Т1$ — трансформатор с обмотками $W1 \dots W3$, $D1$ — декодирующее устройство, $P1$ — поляризованное реле с переключателем $S1$, $C2$ — разделительный конденсатор. Блок питания $БП$ предназначен для переключения поляризованного реле $P1$. Декодирующее устройство предназначено для включения или отключения поляризованного реле $P1$ по принятой кодограмме. Трансформатор $Т1$ состоит из двух обмоток $W1$ и $W2$, намотанных на общем кольцевом ферритовом

сердечнике, и токовой обмотки $W3$, выполненной одиночным проводом, проходящим внутри кольца. Такая конструкция трансформатора обеспечивает его работу в двух режимах:

- токового трансформатора, когда замкнуты контакты 2-3 переключателя $S1$;
- трансформатора напряжения, когда замкнуты контакты 2-1 переключателя $S1$.

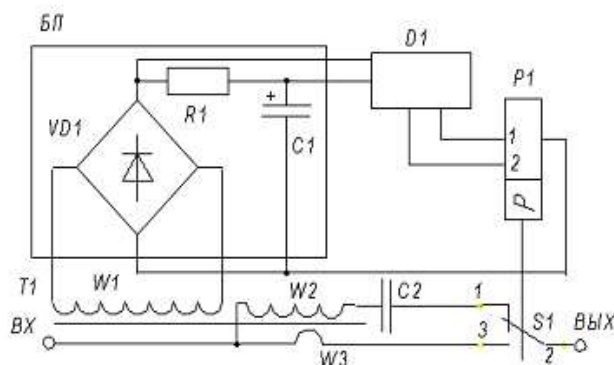


Рис. 4. Структурная схема коммутатора плеча антенны

Разделительный конденсатор $C2$ предназначен для обеспечения развязки между отрезками кабеля антенны при замкнутых контактах 2-1 переключателя $S1$ и для создания рабочего тока через обмотку $W2$ за счет деления напряжения между обмоткой трансформатора и емкостью отключенного отрезка кабеля антенны.

КПА работает по специальному сигналу, поступающему в антенну от передающего устройства.

На рис. 5 приведена форма сигнала, поступающего от передающего устройства в антенну для управления коммутатором.



Рис. 5. Форма управляющего сигнала

Немодулированная часть кодограммы представляет собой несущую частоту длительностью 1...3 с и предназначена для заряда накопительной емкости $C1$ и обеспечения необходимым питанием декодера и реле.

Управляющая часть кодограммы — амплитудно-модулированный сигнал, состоящий из радиоимпульсов, сформированных в группы. Количество импульсов в группах для включения и отключения реле разное.

Ансамбль сигналов управления формируется изменением длительности импульсов и расстояния между ними (изменением тактовой частоты задающего генератора формирователя кодограмм).

В модуляторе передающего устройства ансамбль сигналов модулированной части кодограммы записывается в ПЗУ и в зависимости от рабочей частоты выбирается нужная тактовая частота задающего генератора формирователя кодограмм.

При прохождении через КПА кодограмма детектируется на диодном мосту VD1 и поступает на декодирующее устройство D1.

Декодирующее устройство D1 работает по принципу взаимной корреляции между входящим и опорным сигналами с помощью согласованного фильтра. При совпадении сигналов выдается команда на включение или выключение реле P1 в зависимости от вида кодограммы.

Ансамбль сигналов формируется изменением тактовой частоты опорного генератора в декодирующем устройстве. Изменение тактовой частоты производится сменой специальной заглушки.

Перестройка длины плеча кабельной антенны производится следующим образом:

- перед началом работы все КПА последовательно устанавливаются в замкнутое (включенное) состояние, при этом антенна имеет максимальную длину;
- при включении передающего устройства, если частота предстоящей работы находится выше диапазона частот для максимально длинной антенны, на КПА подается кодограмма для их отключения от "лишних" антенных кабелей, формируя тем самым для рабочей частоты оптимальную длину антенны;
- по окончании работы на все КПА подается кодограмма на их включение (замыкание), и антенная система возвращается в исходное состояние.

Таким образом, предложенный вариант построения коммутируемых быстроразвертываемых антенн для радиопередающих средств можно использовать там, где требуется мобильность и оперативная перестройка антенной системы в широком диапазоне частот. Предложенные технические решения практически не имеют ограничений по частоте и могут быть использованы как на более низких, так и на более высоких частотах относительно рассмотренных (кроме, естественно, частот, где протяженные антенны линейного типа физически не могут быть применены).

Выводы

Для расширения диапазона излучаемых частот и повышения КПД горизонтальных передающих антенн, развертываемых на поверхности Земли, целесообразно использование принципа адаптивного дистанционного управления длиной антенны путем ее формирования из отдельных отрезков кабеля, адресно коммутируемых управляющим сигналом. При этом создаются условия для оптимального согласования антенны с электромагнитным параметром подстилающей поверхности.

Методы управления эффективной длиной антенны на основе принципа взаимности могут быть перенесены также на приемные антенны подобного типа.

Список литературы

- [1] Ю.Г.Мизун, Распространение радиоволн в высоких широтах, М., Радио и связь, 1986.
- [2] Н.И.Федякина, Распространение сверхдлинных радиоволн на трансполярных и субполярных трассах, Новосибирск, Наука, 1980.
- [3] Е.Л.Фейнберг, Распространение радиоволн вдоль земной поверхности, М., Наука, 1999.
- [4] Г.А.Лавров, А.С.Князев, Приземные и подземные антенны, М., Советское радио, 1965.
- [5] В.И.Готовко, А.С.Дегтерев, Г.Ф.Игнатъев, Г.Я.Шайдуров, Прикладная радиофизика длинноволновых полей, IX МНТК "Радиолокация, навигация, связь", Воронеж, 2003, 907–915.
- [6] К.Ю.Муравьев, Справочник по расчету проволочных антенн, Л., ВКАС, 1978.
- [7] Протокол измерений входных параметров стелющихся антенн в расширенном диапазоне частот от 26.10.2004 г., ФГУП ЦКБ "Геофизика", Красноярск, 2004.
- [8] Ю.Ф.Урядников, С.С.Аджемов, Сверхширокополосная связь. Теория и применение. М., СОЛОН-Пресс, 2005.
- [9] В.К.Гаврилов, В.И.Готовко, А.С.Дегтерев, И.Н.Качур, Патент на полезную модель РФ №20199. Диапазонная антенна, 2001.
- [10] В.И.Готовко, А.С.Дегтерев, Г.А.Леонов, В.И.Мезенов, Широкодиапазонная быстроперестраиваемая кабельная антенна, XIII МНТК "Радиолокация, навигация, связь", Воронеж, 2007, 481–485.
- [11] В.И.Готовко, А.С.Дегтерев, В.А.Евстигнеев, В.И.Мезенов, Л.Ф.Победин, В.М.Хрущев, А.А.Юнаков, Патент на изобретение РФ №2317615, Диапазонная антенна с изменяемой активной длиной проводника, 2008.
- [12] В.К.Гаврилов, В.И.Готовко, И.Н.Качур, Г.А.Леонов, Патент на полезную модель РФ №45866, Коммутатор плеча антенны, 2005.

Applied-physics Problems of the Generation of Broadband Surface Coupling Antennas of the Long-wave Band

Vladimir I. Gotovko

The paper deals with the problems of constructing a radio link of low-speed band that can be used in northern regions. We consider the possibility of using mobile stations of cable ground antennas as a transmitter. A method for computing its parameters and distant control of its size is presented.

Keywords: radio link, coupling antennas, cable antennas, regulated station.