

УДК 621.396

Бокла Н. И., канд. техн. наук; Шокотко А. А. аспирант

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОДОВОГО РАЗДЕЛЕНИЯ КАНАЛОВ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ГОЛДА ПРИ ПОСТРОЕНИИ ЛИНИИ РАДИОРЕЛЕЙНОЙ СВЯЗИ

Bokla N. I., Shokotko A. A. Using of channels code division based on modified Gold pseudorandom sequences for constructing microwave communication system. The authors propose the method for constructing the long distance microwave communication systems using a channel code division principle. Channel code division is achieved by spreading the signal spectrum with the use of the modified pseudo-random Gold sequence and 4-position phase modulation signal, what enhance information privacy, signals noise resistance under the influence of narrow band and broadband interference, electromagnetic compatibility with other electronic devices. Use of codes division in order to separate different microwave channels must simplify frequency and equipment planning for the microwave networks with big quantity and high density of microwave links. Also, in the current work authors show comparison of modified Gold pseudo-random sequences to the conventional Gold sequences.

Keywords: radio relay station, signal to noise ratio, antenna, noise-like signal, Gold pseudo-random sequence, noise resistance

Бокла Н. И., Шокотко А. А. Використання кодового розділення каналів на основі модифікованих псевдовипадкових послідовностей Голда при побудові радіорелейної лінії зв'язку. У роботі запропонований спосіб побудови радіорелейної лінії зв'язку великої протяжності з використанням кодового розподілу каналів. Кодовий розподіл каналів досягається шляхом розширення спектру сигналу з використанням модифікованої псевдовипадкової послідовності Голда і 4-позиційного фазомодульованого сигналу, що забезпечує підвищені конфіденційність передачі сигналу, завадостійкість при дії вузькосмугової і широкосмугової завади, електромагнітну сумісність системи з іншими радіоелектронними пристроями.

Ключові слова: радіорелейна станція, відношення сигнал/завада, антена, шумоподібний сигнал, псевдовипадкова послідовність Голда, завадостійкість

Бокла Н. И., Шокотко А. А. Использование кодового разделения каналов на основе модифицированных псевдослучайных последовательностей Голда при построении линии радиорелейной связи. В работе предложен способ построения радиорелейной линии связи большой протяженности с использованием кодового разделения каналов. Кодовое разделение каналов достигается путем расширения спектра сигнала с использованием модифицированной псевдослучайной последовательности Голда и 4-позиционного фазомодулированного сигнала, что обеспечивает повышенные конфиденциальность передачи сигнала, помехоустойчивость при воздействии узкополосной и широкополосной помех, электромагнитную совместимость системы с другими радиоэлектронными устройствами.

Ключевые слова: радиорелейная станция, отношение сигнал/помеха, антенна, шумоподобный сигнал, псевдослучайная последовательность Голда, помехоустойчивость

Радiorелейные линии связи остаются актуальными для передачи информации в условиях плотной застройки города или труднодоступной гористой местности, где прокладка кабельной линии невозможна [1-3]. В настоящее время используются современные радиорелейные станции, которые работают в диапазонах частот 7-86 ГГц и могут передавать информацию по радиоканалу со скоростью 155-1250 Мбит/с в полосе частот 28-500 МГц [3].

Как правило, в радиорелейных станциях используется многопозиционный сигнал, полученный при манипуляции 128QAM, 256QAM, 2048 QAM и др. При этом многопозиционное кодирование увеличивает требования к минимальному отношению сигнал/шум радиоканала, тем самым ухудшает помехозащищенность системы. Вместе с тем

ширина спектра может увеличиться в $1/R$ раз при шифровании или помехоустойчивом кодировании сигнала (R – кодовая скорость, $R=1/2, 2/3, 3/4 \dots$).

В радиорелейных станциях в основном используются прямофокусные параболические антенны: например, антенна HP4-65-D3A фирмы Andrew с диметром раскрыва зеркала 2,7 м, имеющая в рабочем диапазоне частот 6, 425-7, 125 ГГц коэффициент усиления 36,4 дБ и диаграмму направленности шириной 2,7°.

Антенна имеет боковые лепестки: *первый* – под углом 3,8° от оси симметрии главного лепестка 3,8° с усилением 18дБ; *второй* – под углом 3,8° от оси симметрии главного лепестка 5° с усилением 16дБ; *третий* – под углом 15° от оси симметрии главного лепестка с усилением 11 дБ.

Через боковые лепестки антенны приемник может получать тепловые шумы Земли, которые, как показали расчеты, могут не учитываться из-за их малой величины. Особую опасность для работы радиорелейной станции могут составлять мешающие сигналы, получаемые через боковые лепестки от передатчиков соседних радиоэлектронных средств. Кроме того, радиорелейные станции могут ухудшать электромагнитную обстановку в близлежащем регионе, создавая помехи соседним радиоэлектронным средствам через боковые лепестки.

Спектр частот, используемый радиорелейными системами передачи информации, разбивается на отдельные радиостволы с заданными значениями полосы пропускания канала и дуплексного разноса между приемом и передачей двух станций радиорелейного пролета [1-3]. Принцип разбиения спектра на радиостволы описан в рекомендациях ИТУ серии F и призван минимизировать взаимное влияние радиорелейных станций друг на друга внутри одной сети и от внешних источников, работающих в том же диапазоне.

Обычно при небольшой плотности радиорелейных станций в данной местности используют 2-х или 4-х частотный план с изменением поляризации. Однако при планировании радиорелейных сетей с большим количеством передающих станций и высокими требованиями к емкости пролетов количество необходимых радиочастотных каналов для получения приемлемого значения интерференции сильно возрастает. Стоит также отметить, что радиоблоки, которые используются для приема и передачи сигнала могут работать лишь в ограниченном диапазоне частот; при увеличении количества частотных каналов также увеличивается количество оборудования, которое поддерживает их. Таким образом, в крупных радиорелейных трансмиссионных сетях передачи информации расходы на лицензирование частот и закупку необходимых типов радиоблоков составляет достаточно большую часть расходов операторов.

Ограниченность частотного ресурса и необходимость повторного использования частотных каналов является причиной возникновения интерференции сигналов радиорелейных систем. Интерференция радиоволн или помехи – это влияние электромагнитных полей друг на друга, которое изменяет или повреждает информацию, переносимую сигналом от передатчика через канал связи к приёмнику. Чаще всего главной причиной интерференции служат другие радиорелейные пролеты, передающие сигналы на тех же, либо соседних частотных каналах.

Основными причинами интерференции являются :

- Межканальная интерференция: интерференция между одинаковыми частотными каналами; интерференция между соседними частотными каналами; интерференция между приемником и передатчиком;
- Интерференция между пролетами: интерференция, вызванная излучением заднего лепестка антенны; помехи от соседних станций (на радиорелейной линии);
- Помехи от внешних источников: спутниковые системы, радары.

Как следует из вышесказанного, серьезной проблемой при проектировании и эксплуатации радиорелейных линий связи является обеспечения их помехозащищенности от

сигналов, получаемых по боковым лепесткам, а также обеспечения электромагнитной совместимости радиорелейных станций с соседними радиоэлектронными средствами.

Эффективным способом повышения помехозащищенности радиорелейных станций и их электромагнитной совместимости с соседними радиоэлектронными средствами является использование сложного шумоподобного сигнала [4-6].

В классических системах радиорелейной связи используется простой сигнал с базой $B=1$:

$$B = T \cdot \Delta F, \quad (1)$$

где T – длительность бита информационного сигнала;

ΔF – ширина спектра информационного сигнала при выполнении критерия Найквиста, при отсутствии межсимвольной интерференции.

Преобразование информационного сигнала в сложный шумоподобный сигнал (ШПС) с увеличенной базой сигнала $B>1$ дает возможность получить преимущества использования широкополосных сигналов: повышенную помехозащищенность при воздействии узкополосных и широкополосных помех, а соответственно уменьшение количества частотных каналов и оборудования радиоблоков, необходимое для передачи сигналов на них; уменьшение общей интерференционной картины сети и улучшение энергетических характеристик линии, что положительно влияет на годовую доступность сервисов, передающихся по линии; использование псевдослучайных кодов увеличит конфиденциальность передающихся сообщений.

Помехоустойчивость систем с ШПС определяется формулой, связывающей отношение сигнал/помеха на выходе согласованного фильтра или коррелятора q^2 с отношением сигнал/помеха на входе приемника ρ^2 [4]:

$$q^2 = 2B\rho^2, \quad (2)$$

где $\rho^2 = P_c / P_n$, (3)

где P_c, P_n – мощность ШПС и помехи;

$$q^2 = 2E/N_n, \quad (4)$$

где E – энергия ШПС, $E = P_c T$; (5)

$$N_n – \text{спектральная плотность помехи, } N_n = P_n / \Delta F. \quad (6)$$

Отношение сигнал/помеха на выходе согласованного фильтра или коррелятора q^2 определяет рабочие характеристики приема ШПС, а отношение сигнал/помеха на входе приемника ρ^2 – энергетическую ситуацию сигнала и помехи.

При выборе большого значения базы сигнала $B>1$ в системе может быть обеспечено $\rho^2 < 1$, т.е. сигнал будет приниматься, находясь под шумами. Очевидно, что с учетом соотношения (2) прием ШПС согласованным фильтром или коррелятором сопровождается усилением сигнала (или подавлением помехи) в $2B$ раз. Поэтому величину

$$K_{\text{шпс}} = q^2 / \rho^2, \quad (7)$$

называют коэффициентом усиления ШПС при обработке или просто усилением обработки.

В системе с ШПС прием информации характеризуется отношением сигнал/помеха

$$h^2 = q^2 / 2 = B\rho^2. \quad (8)$$

Соотношения (2) и (8) являются фундаментальными в теории систем связи с ШПС. Они получены для помехи в виде белого шума с равномерной спектральной плотностью мощности в пределах полосы частот, ширина которой равна ширине спектра

ШПС. Вместе с тем эти соотношения справедливы также для различных помех – узкополосных, импульсных, структурных.

В общем случае усиление обработки ШПС для произвольных помех будет

$$K_{\text{шпс}} \approx 2B, \quad (9)$$

где степень приближения будет зависеть как от вида помех, так и от базы ШПС.

Рассмотрим возможность применения ШПС при построении линии радиорелейной связи для улучшения ее характеристик. Для расширения спектра предлагается использовать ШПС с фазовой манипуляцией (ФМ), сформированный методом прямого расширения спектра с использованием манипуляции по закону псевдослучайной последовательности (ПСП) [6].

Тогда образуется сложный сигнал с базой

$$B = T/\tau, \quad (10) \quad T = 1/C, \quad (11)$$

где τ – длительность элементарного импульса,

C – скорость передачи информационного сигнала.

Для манипуляции сигнала могут быть использованы различные ПСП: m -последовательность, последовательность Касами, Голда и др., а также код Уолша.

Главное требование при выборе вида манипулирующей последовательности – получение ансамбля кодированных сигналов, имеющих минимальные лепестки взаимокорреляционных функций (ВКФ) попарных сигналов. Выполнение этого требования принципиально важно при вхождении системы в синхронизм. При этом также важно получить максимальное количество кодированных каналов при данной длительности манипулирующего кода и заданной ширине полосы частот радиоканала, а также при минимальной величине B – необходимом расширении спектра сигнала.

Как показывают исследования, использование ПСП Голда показывают наилучший результат, так как они имеют наибольшее количество реализаций, чем другие ПСП [6]. Для повышения эффективности телекоммуникационных систем используются многопозиционные ФМ-сигналы, которые дают возможность в n раз уменьшить необходимую ширину полосы пропускания радиоканала (n – количество разрядов двоичного сигнала).

Классические ПСП Голда в большинстве случаев имеют количество элементарных импульсов, не кратное количеству разрядов многопозиционного сигнала n , что препятствует их непосредственному использованию для формирования многопозиционных ФМ-сигналов. Поэтому предложено к классической ПСП Голда добавлять или отнимать определенное количество импульсов, чтобы новые ПСП – названные модифицированными ПСП Голда – имели количество импульсов, кратное количеству разрядов многопозиционного сигнала n [7].

Модифицированные ПСП Голда образуются из классических ПСП Голда. Рассмотрим процесс образования классической ПСП Голда длиной $N=15$ для создания модифицированной ПСП Голда, которую, как будет показано ниже, целесообразно использовать для решения поставленной задачи (Табл. 1).

Для формирования классической ПСП Голда длиной $N=15$ импульсов существуют два полинома т.е. две m -последовательности-полиномы вида X^4+X^1+1 (410) и X^4+X^3+1 (430) [4].

Рассмотренные m -последовательности имеют нулевые боковые лепестки автокорреляционной функции (АКФ), однако их количество очень малое. На основе данных m -последовательностей может быть образовано 15 реализаций классических ПСП Голда и они имеют максимальные боковые лепестки АКФ, равные 0,5.

Структура реализаций классической
ПСП Голда длиной $N=15$ импульсов

Табл. 1

№	Исходные m -последовательности															
	$f_a =$	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0
	$f_b =$	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0
Реализации классической ПСП Голда																
1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	
2	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	
3	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	
4	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	
5	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	
6	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	
7	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	
8	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	
9	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	
10	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	
11	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	
12	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	
13	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	
14	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	
15	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	

Возможны различные варианты образования модифицированной ПСП Голда: путем добавления +1 и -1 в конце и в начале классической последовательности, а также исключения одного импульса в конце или в начале последовательности.

В работе [8] с использованием разработанного метода графического интерфейса пользователя был исследован массив реализаций модифицированных ПСП Голда, полученный путем добавления 1 импульса (-1) в конце последовательности.

Как показали исследования, для построения системы целесообразно использовать 11 реализаций модифицированных ПСП Голда, полученных из классической ПСП Голда длиной 15 импульсов при добавлении 1 импульса (-1) в конце последовательности: №№ 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 13, 14, максимальный уровень лепестков ВКФ которых не превышает 0,5, а минимальный уровень составляет 0,15-0,25.

Ширина спектра радиосигнала и соответственно полоса пропускания радиоканала при соблюдении критерия Найквиста для отсутствия межсимвольной интерференции при нулевом коэффициенте фильтрации будет [6]:

$$\Delta f'_k = 1/\tau', \quad (13)$$

где τ' – длительность элементарного импульса модифицированной последовательности Голда.

Полоса пропускания для двоичного M -позиционного сигнала с количеством разрядов n , созданного благодаря применению модифицированной ПСП Голда, будет уменьшаться в n раз и будет определяться формулой

$$\Delta f'_k = 1/\tau'n. \quad (14)$$

Учитывая изложенные выше достоинства широкополосных сигналов, рассмотрим возможность построения дуплексной линии радиорелейной связи с 10-ю пролетами в диапазоне частот 7 ГГц, которая может обеспечить передачу сигнала на расстоянии 50-200 км (Рис. 1).

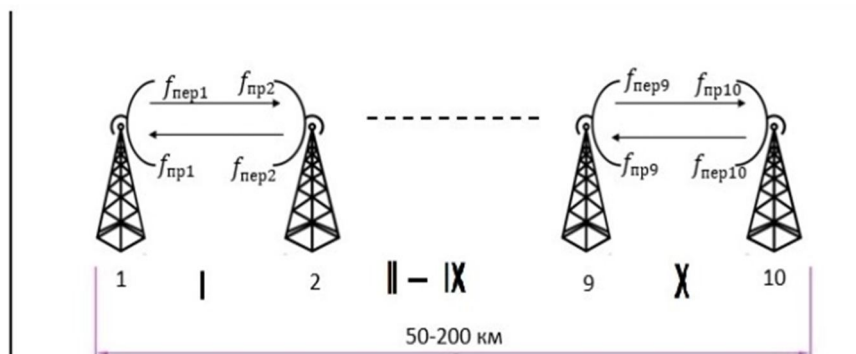


Рис. 1. Схема линии радиорелейной связи

При классическом методе частотного планирования ширина спектра одного канала будет составлять 28 МГц, расстояние между частотами передатчика и приемника в одном пролете – 161 МГц, а расстояние между частотами передатчиков или приемников соседних пролетов – 28 МГц. При этом в радиолинии из 10 пролетов с различными частотами в каждом пролете общая ширина спектра будет составлять 441 МГц (Табл. 2).

Распределение частот в системе с классической схемой планирования частот

Табл. 2

№п/п	№ пролета	Частота передатчика , $f_{пер n}$, МГц	Частота приемника , $f_{пр n}$, МГц
1	I	7138,5	7299,5
2	II	7166,5	7327,5
3	III	7194,5	7355,5
4	IV	7222,5	7383,5
5	V	7250,5	7411,5
6	VI	7278,5	7439,5
7	VII	7306,5	7467,5
8	VIII	7334,5	7495,5
9	IX	7362,5	7523,5
10	X	7390,5	7551,5

При построении радиолинии с кодовым разделением каналов каждый пролет будет использовать 1 кодированный канал в общем спектре сигнала. При использовании модифицированной ПСП Голда длиной 16 импульсов и 4-х позиционного ФМ общая ширина спектра сигнала будет составлять 224 МГц в одном направлении. Ширина спектра для дуплексной связи при разделении интервалом 28 МГц будет составлять 476 МГц.

Несмотря на незначительное превышение общей ширины спектра сигналов с кодовым разделением каналов на основе модифицированной последовательности Голда с ФМ-4 в сравнении с использованием классического метода частотного планирования предложенная система с кодовым разделением каналом, имеющая шумоподобный сигнал, имеет существенные преимущества в части обеспечения скрытности, помехозащищенности и электромагнитной совместимости.

Выводы

1. Радиорелейная линия связи при использовании классического метода частотного планирования имеет низкие показатели конфиденциальности передачи информации, помехозащищенности и электромагнитной совместимости.

2. При построении линии радиорелейной линии связи большой протяженности с использованием кодового разделения сигналов на основе применения модифицированной ПСП Голда и многопозиционного ФМ сигнала позволяет существенно повысить скрытность, помехозащищенность и электромагнитную совместимость системы.

Литература

1. Каменский Н. Н. Справочник по радиорелейной связи / Н. Н. Каменский, А. М. Модель, Б. С. Надененко, Л. В. Надененко, И. Л. Папернов, Т. Г. Тараканова, А. А. Шур, И.С. Цирлин, В.Г. Ямпольский ; под ред. С. В.Бородича. – Москва : Радио и связь, 1981. – 416 с.
2. Henne I. Planning of line-of-sight radio relay systems / Ingvar Henne, Per Thorvaldsen. – Second edition. – Nera, 1999.
3. Семенко А. І. Особливості планування радіорелейних систем у мереж мобільного зв'язку / А. І. Семенко, А. А. Шокотко // Вісник національного університету «Львівська політехніка» : Серія «Радіоелектроніка та телекомунікації». – 2014. – №796. – С. 113-118.
4. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Л. Е. Варакин. Москва : Радио и связь, 1985. – 384 с.
5. Ипатов В. П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов / В. П. Ипатов. – Москва: Техносфера, 2007. – 488 с.
6. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети / Вильям Столлингс. – Москва:, Санкт-Петербург:, Киев : Вильямс,2003. – 639 с.
7. Семенко А. І. Метод двократного зменшення необхідної смуги пропускання каналу зв'язку в телекомунікаційній системі з кодовим розподілом каналів / А. І. Семенко, Н. І. Бокла. // Зв'язок. – 2011. – №4. – С.23-25.
8. Бокла Н. І. Дослідження кореляційних властивостей ПВП за кодом Голда з використанням системи MATLAB / Н. І. Бокла // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2011. – Том 9. – №4. – С.386-391.

Автори статті

Бокла Наталія Іванівна, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри телекомунікаційних систем, Державний університет телекомунікацій, Київ. Тел. +380 (50) 956 38 52. E-mail: nataloshka_77@ukr.net

Шокотко Андрій Андрійович, аспірант кафедри телекомунікаційних систем, Державний університет телекомунікацій, м. Київ.. Тел. +380 (93) 567 20 19. E-mail: andrey.shokotko@gmail.com

Authors of the article

Bokla Nataliya Ivanivna, candidate of sciences (technical), senior lecturer of the telecommunication systems department, State University of Telecommunications, Kiev. Tel. +380 (50) 956 38 52. E-mail: nataloshka_77@ukr.net

Shokotko Andriy Andriyovych, postgraduate student at the telecommunication systems department, State University of Telecommunications, Kiev. Tel. +380 (93) 567 20 19. E-mail: andrey.shokotko@gmail.com

Дата надходження в редакцію: 24.01.2016 р.

Рецензент: д.т.н., проф. О. М. Власов