

УДК 621.396.967

Н.П. Кандырин

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

ЦИФРОВОЕ ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ В РАДИОЛОКАЦИИ И МЕДИЦИНЕ

В статье рассматриваются цифровые формирователи многочастотных сигналов в интересах радиолокации и медицины. Приведены временные и спектральные характеристики таких сигналов, рассчитанных на ЭВМ и полученных экспериментально с помощью цифровых синтезаторов сигналов.

Ключевые слова: многочастотный сигнал, несущая частота, спектр, метод, ЦСС, ШПС, ПСС.

Введение

Постановка проблемы. В современных условиях организации радиосвязи, радиолокации важной задачей является обеспечение ее скрытности, т.е. защита передаваемого сообщения от несанкционированного доступа противоположной стороной, что обеспечивается использованием многочастотного сигнала (МЧС). При этом скрытность сообщения возрастает, если в процессе передачи информации (зондирования) менять как амплитуды A_i и фазы φ_i для каждой частоты, так и количество частот в МЧС и их номиналы, т.е. формировать широкополосные сигналы (ШПС). Подобные сигналы нашли широкое применение и в других отраслях народного хозяйства, в том числе и в медицинской технике [1 – 8].

Для формирования МЧС лучше всего подходят цифровые синтезаторы сигналов (ЦСС) с многоуровневым синтезом [9 – 11]. Однако, спектр фор-

мируемых ими колебаний не является идеальным, так как содержит наряду с полезными колебаниями паразитные спектральные составляющие (ПСС).

Существующие до настоящего времени подобные формирователи МЧС отличаются большими массогабаритными размерами, большим энергопотреблением и невозможностью быстро и гибко менять параметры формируемых сигналов в широких пределах.

Целью статьи является исследование вопроса формирования многочастотных сигналов ЦСС, их спектрального состава, уровня ПСС, искажения полезных составляющих и т.п., а также возможность гибкого управления его параметрами.

Основной материал

Разработку методов формирования многочастотных сигналов и их спектральных характеристик начнем с рассмотрения обобщенной структурной схемы ФМЧС, которая приведена на рис. 1.

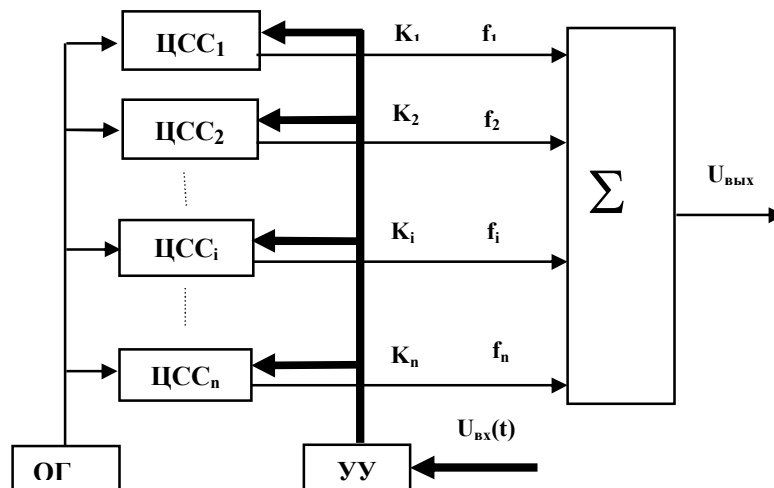


Рис. 1. Структурная схема ФМЧС

ФМЧС включает в себя:

– ОГ – опорный генератор, формирующий тактовую частоту f_0 ;

– ЦСС_{*i*} – синтезатор *i*-го одночастотного сигнала

$$U_i(t) = A_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (1)$$

или сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ)

$$U_i(t) = A_i \cos \left[2\pi \left(f_0 - \frac{\Delta f}{2} \right) t + \beta \frac{(t_i)^2}{2} + \varphi_i \right]; \quad (2)$$

– УУ – устройство управления, формирующего коды управления частотой, фазой и амплитудой

$$K_i = \{K_i^f, K_i^\varphi, K_i^A\},$$

с помощью этих кодов сигналы $U_i(t)$ модулируются по частоте f_i , фазе φ_i и амплитуде A_i в соответствии с решаемыми задачами $U_{\text{вх}}(t)$;

– Σ – сумматор, на выходе которого формируется выходной сигнал $U_{\text{вых}}(t)$, равный сумме сигналов ЦСС $U_i(t)$:

$$U_{\text{вых}}(t) = \sum_{i=1}^n U_i(t). \quad (3)$$

При разработке математической модели выходного колебания ФМЧС $U_{\text{вых}}(t)$ для начала будем считать:

– $U_{\text{вх}}(t) = 0$, т.е. на выходе формирователя формируется немодулированный сигнал ($A_i = \text{const}$, $\varphi_i = 0$) из n частот $U_i(t)$;

– частоты сигналов $U_i(t)$ отстоят в многочастотном сигнале на равном расстоянии друг от друга.

Принятые допущения позволяют записать коды частот K_i^f следующим образом:

$$K_i^f = K_1 + (i-1)\Delta K, \quad (4)$$

где ΔK определяет частотную расстройку между соседними частотами $\Delta f = \Delta K/2R$, а код K_1 код частоты первого ЦСС₁.

Тогда спектр i – колебания $U_i(t)$ согласно теореме о сумме спектров [12]:

$$C_T = \sum_{i=1}^{N_{\text{выб}}-1} \frac{A_i}{\pi n} \sin(\alpha * \tau_i) \exp(-2j\alpha * t_{3,i}), \quad (5)$$

где $N_{\text{выб}} = MN_\varphi/2$ – число выборок в сигнале на периоде работы накопителя T_n , можно рассчитать по следующей формуле

$$G_i(f) = \sum_{k=1}^{\infty} C_k(i) \delta(2\pi f - k\Omega), \quad (6)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots$ – номера спектральных составляющих; комплексные амплитуды $C_k(i)$ спектральных составляющих определяются по формуле

$$C_k(i) = \sum_{m=1}^{N-1} \frac{A_m}{\pi m k} \sin[\alpha(i,k)(t_m - t_{m-1})] \times \exp[-j\alpha(i,k)(t_m + t_{m+1})], \quad (7)$$

где $\alpha(i,k) = \frac{\pi k K_i^f}{2NR}$; $A_m = \text{ent}[N_A, \sin \varphi_m] / N_A$;

$$t_m = 2T_0 \frac{R(m+1)}{K_i^f N_\varphi}; \quad \varphi_m = \text{ent}\left[\frac{iKN_\varphi}{R}\right] \times \frac{2\pi}{N_\varphi},$$

а число N определяется из условия $N_{\text{выб}} = MN_\varphi/2$.

Согласно теореме о сумме спектров для суммы колебаний (3) справедливо следующее выражение:

$$G_{\text{вых}}(f) = \sum_{i=1}^n G_i(f). \quad (8)$$

На рис. 2, а показан рассчитанный на ЭВМ суммарный сигнал трех гармоник для медицинской техники, а на рис. 2, б – их спектр.

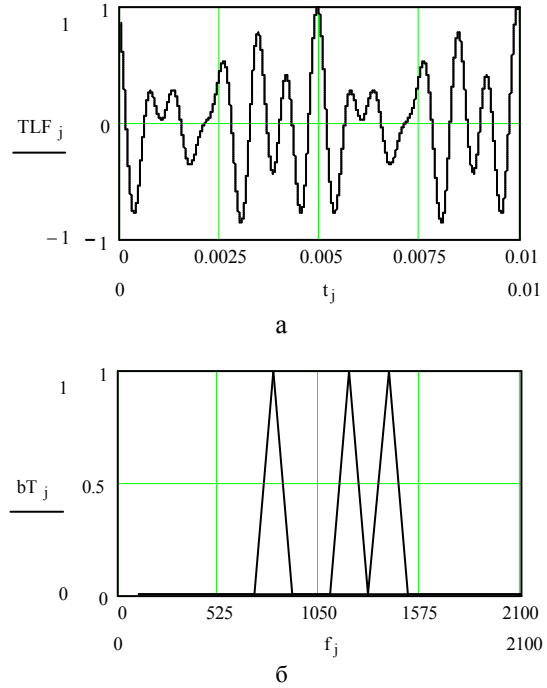


Рис. 2. Суммарный сигнал трех гармоник и их спектр

Суммарный вид рассчитанного многочастотного ЛЧМ сигнала и его спектр показан на рис. 3.

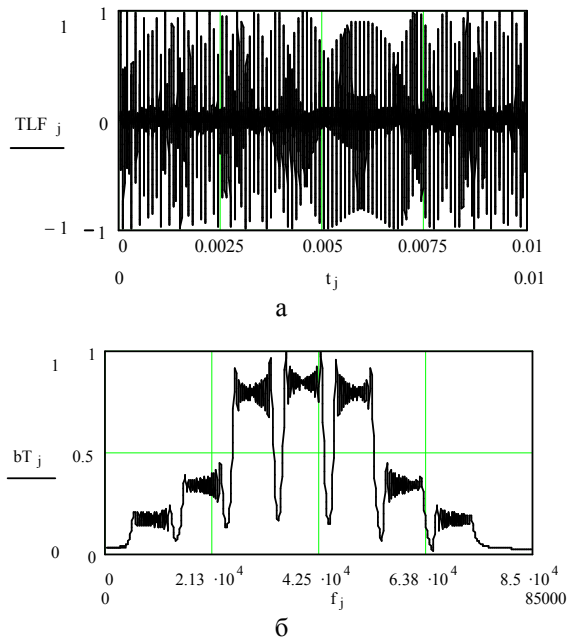


Рис. 3. Суммарный сигнал многочастотного ЛЧМ сигнала и их спектр

Так как все ЦСС_i синхронизируются от одного опорного генератора с частотой f_r , а емкости R накопителей кодов ЦСС в ФМЧС (рис. 1) выбраны одинаковыми, то ПСС спектров будут «накладываться» друг на друга.

В результате этого в спектре выходного колебания (рис. 5) ФМЧС уровни полезных частот в отличие от спектра идеального МЧС (рис. 2) будут различными.

Поэтому для оценки спектра ФМЧС кроме такого параметра как максимальный уровень дискретной побочной составляющей P, под которым будем понимать отношение уровня наименьшей амплитуды A_{\min} полезной частоты МЧС к уровню наибольшей побочной составляющей A_{\max}

$$P = 20 \lg(A_{\min} / A_{n \max}), \quad (9)$$

будем пользоваться таким параметром как неравномерность уровней полезных частот, которую будем оценивать коэффициентом неравномерности:

$$\Delta P = 20 \lg(A_{\max} / A_{\min}). \quad (10)$$

Экспериментальные исследования цифроаналоговых ФМЧС проводились на специально разработанных макетах, внешний вид одного из которых показан на рис. 4.



Рис. 4. Внешний вид устройства ФМЧС, блока питания и анализатора спектра

Целью исследований являлось подтверждение возможностей применения цифровых методов для формирования набора сложных многочастотных сигналов с изменяемыми параметрами и высокой долговременной стабильностью частоты.

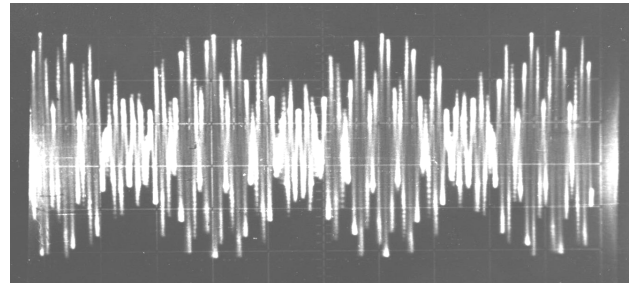
Качество работы ФМЧС при эксперименте оценивалось по стабильности спектров выходных сигналов и путем измерения уровня ПСС в спектре выходного сигнала. При этом для измерения параметров сигнала использовался поверенный анализатор спектра СК4-56.

Неравномерность спектральных составляющих выходного сигнала измерялась в двух контрольных точках:

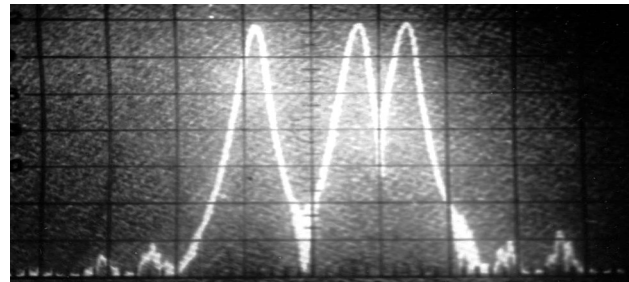
– на выходе цифроаналогового преобразователя;

– на выходе полосового фильтра и усилителя.

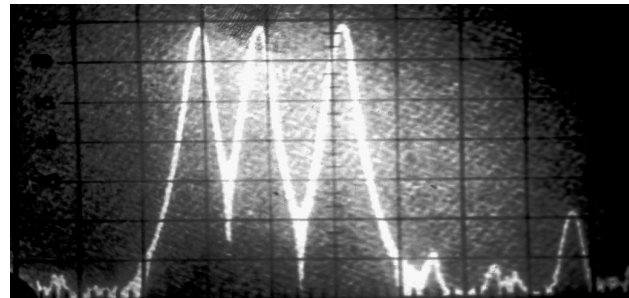
На рис. 5, а показан суммарный сигнал трех моносигналов полученных экспериментально, а на рис. 5, б и рис. 5, в – их спектры с различной расстановкой гармоник.



а



б



в

Рис. 5. Экспериментально полученный суммарный сигнал трех гармоник (а), б и в – их спектры с различной расстановкой гармоник

Неравномерность полезных спектральных составляющих на выходе ЦАП не превышала 0,5 дБ на всех режимах работы. Неравномерность на выходе усилителя не превышала 1,2 дБ и обусловлена невозможностью сделать равномерную АЧХ полосового фильтра.

Измеренный уровень ПСС показал, что отсутствие в полосе фильтра третьей гармоники основных составляющих, уровень ПСС не хуже –55дБ (рис. 5, б). При попадании в полосу пропускания фильтра третьей гармоники основных составляющих, уровень ПСС не хуже –45дБ (рис. 5, в).

Проведенные измерения показали, что разработанное устройство обеспечивает формирование частотных составляющих с относительной нестабильностью частоты не хуже $\Delta f < 1,4 \times 10^{-5}$. При этом точность установки частотных составляющих не хуже 0,45Гц.

В ходе экспериментальных исследований проверялась возможность формирования многочастотных ЛЧМ сигналов для РЛС с распознаванием класса целей. Рассчитанный на ЭВМ суммарный сигнал МЧС с ЛЧМ и его спектр показан на рис. 3. Полученный экспериментально с помощью ФМЧС ЛЧМ спектр, перенесенный с помощью смесителя в диапазон СВЧ (ЗГГц), показан на рис. 6.

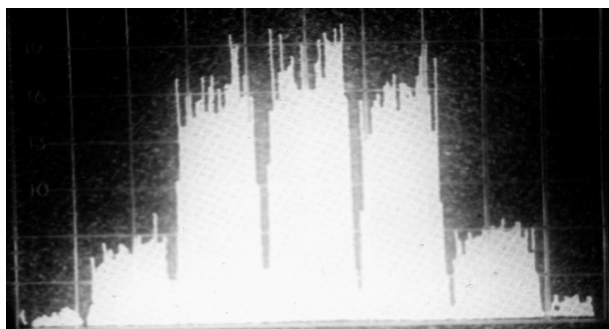


Рис. 6. Вид спектра многочастотного ЛЧМ сигнала, сформированного ФМЧС и перенесенного в область СВЧ с помощью смесителя

Выводы

Результаты экспериментальных исследований позволили сделать следующие выводы:

1. При больших расстройках между частотами ($\Delta K > 10$) спектр сигнала ФМЧС представляет собой сумму спектров моносигналов (ЛЧМ), т.е. имеет вид, показанный на рис. 5, 6. В этом случае неравномерность уровня полезных составляющих $\Delta P \cong 0$, а уровень побочной составляющей $P = -55$ дБ.

2. При малых расстройках между частотами ($\Delta K = 2, 4$) в спектре сигнала ФМЧС происходит «наложение» спектров моносигналов (ЛЧМ), в результате чего уровень ΔP составляет 1,2 дБ, а уровень P снижается с -55 дБ до -45 дБ.

Таким образом, можно сделать следующее заключение: ЦСС многоуровневого синтеза способны формировать простые многочастотные и сложные

сигналы в радиолиниях, радиолокации и медицинской технике, спектры которых приведены на рис. 5 и рис. 6.

Список литературы

1. Гуревич И.Н. Синтез сетки частот с произвольным шагом / И.Н. Гуревич, Ю.А. Никитин // Радиотехника. – 1992. – № 4. – С. 89-93.
2. Манасевич В. Синтезаторы частот. Теория и проектирование: Пер. с англ. под ред. А.С. Галина / В. Манасевич. – М.: Связь, 1979. – 384 с.
3. Шапиро Д.Н. Основы теории синтеза частот / Д.Н. Шапиро, А.А. Паин. – М.: Радио и связь, 1981. – 264 с.
4. Вишин Г.В. Многочастотная радиолокация / Г.В. Вишин // Техника и вооружение. – 1971. – № 8.
5. Ширман Я.Д. Теоретические основы радиолокации / Я.Д. Ширман. – Х.: ВИРТА, 1984.
6. Радиопередающие устройства / М.В. Балакирев, Ю.С. Вохмяков, А.В. Журиков и др.; под ред. О.А. Челнокова. – М.: Радио и связь, 1982. – 256 с.
7. Рыжков А.В. Синтезаторы частот в технике радиосвязи / А.В. Рыжков, В.Н. Попов. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с., ил.
8. Кук Ч. Радиолокационные сигналы: пер. с англ. под ред. В.С. Кельзона / Ч. Кук, М. Бернфельд. – М.: Сов. радио, 1971. – 568 с.
9. Кочемасов В.Н. Формирование сигналов с линейной частотной модуляцией / В.Н. Кочемасов, Л.А. Белов, В.С. Оконеишиков. – М.: Радио и связь, 1983. – 192 с.
10. А.С. 1552345 (СССР). Цифровой синтезатор частотно-модулированных сигналов / Гомозов В.И., Кандырин Н.П., Романов Ю.М., Михайлов Н.А. – Оpubл. Б.И. – 1990. – №11.
11. Кандырин Н.П. Методика проектирования цифровых синтезаторов сигналов на основе программируемых логических интегральных схем / Н.П. Кандырин, А.М. Дзигора, А.И. Омельченко // Збірник наукових праць Об'єднаного науково-дослідного інституту Збройних Сил. – Х.: ОНДІ ЗС, 2005. – Вип. 2 (2). – С. 131-141.
12. Харкевич А.А. Теоретические основы радиосвязи / А.А. Харкевич. – М.: ГИИТЛ, 1957. – С. 119-135.

Поступила в редколлегию 26.10.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.И. Сухаревский, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ЦИФРОВЕ ФОРМУВАННЯ БОГАТОЧАСТОТНИХ СИГНАЛІВ В РАДІОЛОКАЦІЇ ТА МЕДИЦИНІ

М.П. Кандирін

У статті розглядаються цифрові формувачі багаточастотних сигналів в інтересах радіолокації та медицини. Приведені тимчасові та спектральні характеристики таких сигналів, розрахованих на ПЕВМ, та отриманих експериментально за допомогою цифрових синтезаторів сигналів.

Ключові слова: багаточастотний сигнал, несуча частота, спектр, метод, ЦСС, ШСС, ПСС.

DIGITAL FORMING OF MULTIFREQUENCY SIGNALS IN RADAR AND MEDICINE

N.P. Kandyrin

In the article it is considered digital formers of multifrequency signals in the interests of radar and medicine. It is given time and spectral characteristic such signals calculated in computer and got big means of signals digital synthesizers.

Keywords: multifrequency signals, carrier frequency, specter, method.