15. Оценка эффективности огневого поражения ударами ракет и огнем артиллерии / Под ред. А.А. Бобрикова. – СПб.: «Галея Принт», 2006. – 424 с.

16. Чуев Ю.В. Прогнозирование в военном деле / Ю.В. Чуев, Ю.Б. Михайлов. – М.: Воениздат, 1975. – 279 с.

17. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей / Б.В. Гнеденко. – М.: Наука, 1988. – 448 с.

18. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с.

19. Алимов Ю.И. Альтернатива методу математической статистики / Ю.И. Алимов. – М.: Знание, 1980. – 64 с.

20. Тутубалин В.Н. Теория вероятностей/ В.Н. Тутубалин. – М.: Изд-во Московского университета, 1972. – 230 с.

21. Тутубалин В.Н. Границы применимости (вероятностно-статистические методы и их возможности) / В.Н. Тутутбалин. – М.: Знание, 1977. – 63 с.

Надійшла до редакції 5.10.2010 р.

Рецензент: доктор технічних наук, старший науковий співробітник А.М. Зубков, Академія сухопутних військ, Львів.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБОСНОВАНИЯ ОПЕРАТИВНО-ТАКТИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ К ПЕРСПЕКТИВНЫМ СИСТЕМАМ (КОМПЛЕКСАМ, ОБРАЗЦАМ) ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

А.Н. Куприненко

Проведен анализ существующих методов моделирования боевых действий на долгосрочную перспективу. Установлено возможности их применения для дальнейшего решения проблемы формирования оперативно-тактических требований к перспективным системам (комплексам, образцам) вооружения и военной техники.

***Ключевые слова:** методы моделирования боевых действий, оперативно-тактические требования, вооружение и военная техника.*

ANALYSIS OF METHODS OF GROUNDING OPERATIONAL-TACTICAL REQUIREMENTS FOR PERSPECTIVE SYSTEMS (COMPLEXES, MODELS) ARMAMENT AND MILITARY MATERIEL

A.N. Kuprinenko

Analysis of existing methods of combat actions modeling for long-range perspective has been conducted. Possibilities of their employment for further solution of the problem of forming operational-tactical requirements for perspective systems (complexes, models) armament and military materiel have been established.

***Keywords**: methods of combat actions modeling, operational-tactical requirements, armament and military materiel.*

УДК 629.113:656.13

Ю.И. Бударецкий[1], В.И. Грабчак[1], В.А. Канинский[2], В.В. Прокопенко[1]

[1] *Академия сухопутных войск имени гетмана Петра Сагайдачного, Львов*
[2] *Филиал ООО «НПП «Эфир-С», Львов*

МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЦИФРОВОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ДОППЛЕРОВСКИХ РЛС АРТИЛЛЕРИЙСКИХ СИСТЕМ

В статье предложены аналитический метод и метод имитационного моделирования оптимизации параметров цифрового измерителя допплеровских РЛС артиллерийских систем. Рассмотрена структурная схема цифровой системы фазовой синхронизации, представлены разностные уравнения и передаточные функции, определены условия ее устойчивости. Представлена имитационная модель цифровой системы фазовой синхронизации позволяющая произвести оптимизацию ее параметров, определить временные характеристики и точность оценки параметров движения объектов для систем автономной навигации и баллистической подготовки артиллерийских систем.

***Ключевые слова**: цифровая система фазовой синхронизации, аналитические и имитационные модели*

Введение

Постановка проблемы. Ведение точного и своевременного артиллерийского огня невозможно без качественного проведения мероприятий топогеодезической, баллистической, метеорологической подготовки, которые являются составными частями полной подготовки стрельбы. Основным преимуществом полной подготовки для определения установок стрельбы есть то, что она обеспечивает постоянную готовность артиллерийских систем (АС) и подразделений к стрельбе без пристрелки как в наступлении, так и в обороне, независимо от погодных условий и в любое время суток [1]. Основным критерием такой подготовки есть точность определения топогеодезической и баллистической информации. Поэтому в условиях современного боя возникает актуальность дооснащения каждой АС средствами автоматического определения топогеодезической и баллистической информации.

Анализ последних исследований и публикаций. Основным средством получения информации о параметрах движения в подсистемах автономной навигации и баллистической подготовки являются допплеровские РЛС с непрерывным излучением. Приемопередающие модули таких РЛС формируют сигналы допплеровских частот, которые в дальнейшем обрабатываются измерителем на основе цифровой системы фазовой синхронизации (ЦСФС), конструктивно совмещенным с автоматизированным формирователем установок стрельбы (АФУС) [2].

В настоящее время теория непрерывных систем фазовой синхронизации достаточно развита и изложена во многих фундаментальных публикациях [3, 4], в то же время теория ЦСФС переживает период бурного развития и даже удачные попытки систематизировать отдельные публикации [5, 6] не дают адекватного решения всех многочисленных проблем реализации таких систем.

Целью статьи является разработка аналитических соотношений и программ имитационного моделирования на ЭВМ для оптимизации параметров цифрового измерителя допплеровских РЛС, предназначенных для оценки характеристик движения в подсистемах автономной навигации и баллистической подготовки артиллерийских систем.

Основная часть

Целесообразность проведенного в [2] выбора цифровой реализации измерителя для обеспечения АС навигационной и баллистической информацией обосновывается тем, что цифровые методы обработки сигналов позволяют значительно увеличить стабильность параметров аппаратуры и динамический диапазон работы, обеспечить идеальные запоминание и накопление сигналов, удобство измерения параметров и сопряжение с цифровой вычислительной машиной. В системах синхронизации и измерения параметров отраженных сигналов цифровые методы, в частности, позволяют существенно уменьшить эквивалентную полосу следящей системы при одновременном расширении полосы синхронизма, осуществить нормальную работу при очень низком отношении сигнал – шум во входной полосе. Кроме того, они позволяют решить ряд других задач, вызывающих большие, а иногда практически непреодолимые трудности при использовании аналоговой техники [5]. Структурная схема рассмотренного в [2] цифрового измерителя на основе ЦСФС приведена на рис. 1.

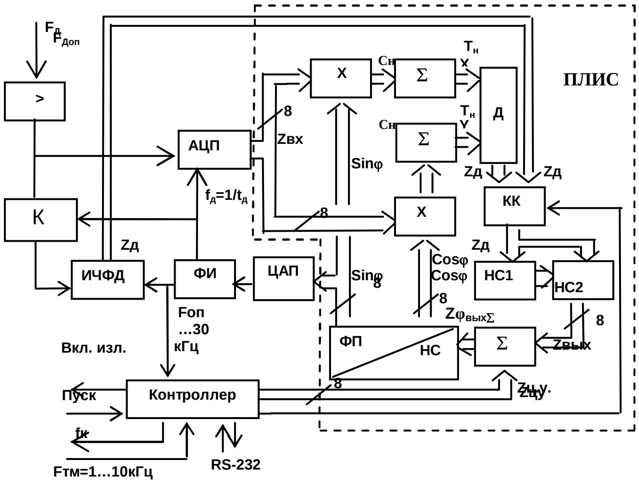

Рис.1. **Структурная схема ЦСФС, где:**
ИЧФД – импульсный частотно-фазовый дискриминатор,
Д – дискриминатор, К – компаратор, КК – коммутатор кодов, НС – накопительный сумматор,
ФП – функциональный преобразователь,
ФИ – формирователь импульсов,
ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема

Основной особенностью представленного на рис. 1 измерителя является дискретизации по времени и квантование по уровню обрабатываемых сигналов, что создает ряд специфических особенностей при его проектировании – усложняет алгоритмы достижения заданных точностных характеристик и ограничивает область устойчивости.

Аналитический метод выбора параметров цифровых измерителей с ЦСФС проводится на основе анализа их передаточных функций, что, в отличии от аналоговой реализации, требует перехода от дифференциальных уравнений к разностным с использованием Z-преобразования.

Разностное уравнение ЦСФС со вторым порядком астатизма имеет вид [7]

$$\begin{aligned}&\varphi_{[R]} + (K_{b1}/2 + K_{b2}/2 - 2)\cdot\varphi_{[R-1]} + (K_{b2}/2+1)\times\\ &\times\varphi_{[R-2]} - K_{b1}/2\cdot\varphi_{[R-3]} = \varphi_{C[R]} - 2\varphi_{C[R-1]} +\\ &+\varphi_{C[R-2]} - (K_{b1}+K_{b2})\varphi_{Ш[R-1]} + K_{b1}\varphi_{Ш[R-2]},\end{aligned} \qquad (1)$$

где $K_{b1} = 2k_g K_1 \pi \Delta F T_H$, $K_{b2} = 2k_g K_2 \pi \Delta F T_H$ безразмерные коэффициенты передачи соответственно по пропорциональной и интегрирующей ветвям петлевого фильтра, φ_C – фаза сигнала на входе, k_g – коэффициент передачи дискриминатора, K_1, K_2 – коэффициенты передачи цифрового фильтра соответственно по пропорциональным и интегрирующим петлям, ΔF – дискрет перестройки цифрового синтезатора частоты, T_H – время предварительного усреднения отсчетов в накопительном сумматоре перед их функциональной обработкой – реализацией алгоритмов дискриминатора и петлевого фильтра, R – номер такта регулирования.

В свою очередь, интервал предварительного усреднения цифровых отсчетов T_H связан с частотой $f_Д$ (периодом $t_Д$) дискретизации через емкость накопительного сумматора со сбросом C_H выражением

$$T_H = t_Д C_H = \frac{C_H}{f_Д}. \qquad (2)$$

Передаточные функции ЦСФС, характеризующие ее динамические и флюктуационные характеристики, описываются выражениями:

$$K_g(z) = (z^3 - 2z^2 + z)/[z^3 + (K_{b1}/2 + K_{b2}/2 - 2)\times \times z^2 + (K_{b2}/2+1)\cdot z - K_{b1}/2]; \qquad (3)$$

$$K_Ш(z) = [-(K_{b1} + K_{b2})z^2 + K_{b1}\cdot z]/[z^3 + + (K_{b1}/2 + K_{b2}/2 - 2)\cdot z^2 + (K_{b2}/2+1)\times \times z - K_{b1}/2], \qquad (4)$$

где Z – преобразование, $K_ш$, K_g – передаточные функции ЦСФС, характеризующие ее динамические и флюктуационные свойства.

При этом динамическая ошибка $M\varphi$ ЦСФС при входном воздействии

$$\Omega_C(t) = \alpha t, \quad \varphi_C(t) = \alpha t^2 / 2 \qquad (5)$$

имеет вид

$$M\varphi = \alpha T_H^2 / K_{b2}, \qquad (6)$$

где α – скорость изменения допплеровской частоты.

Флюктуационная ошибка описывается выражением

$$\sigma_\varphi^2 = N_e^*[K_{b1}^2(K_{b1}+2) + K_{b2}(K_{b1}^2 + K_{b1}K_{b2}/4 + + K_{b1} + K_{b2}/2 + 2)]/[2K_{b1}(2-K_{b1}) - - K_{b2}(2+K_{b1})]T_н. \qquad (7)$$

Характеристический многочлен выражения (7)

$$P(z) = z^3 + (K_{b1}/2 + K_{b2}/2 - 2)\cdot z^2 + + (K_{b2}/2+1)\cdot z - K_{b1}/2$$

дает следующие условия устойчивости

$$\begin{cases} K_{b1} > 0, \\ K_{b2} > 0, \\ K_{b2} + 2K_{b1} - 4 < 0, \\ 2K_{b1}K_{b2} + 4K_{b2} - 8K_{b1} + 4K_{b1}^2 < 0. \end{cases} \qquad (8)$$

Приведенные выражения позволяют получить ориентировочные параметры ЦСФС и не учитывают погрешностей предшествующего АЦП аналогового тракта, ограниченности разрядной сетки вычислителя при реализации алгоритмов дискриминаторов и ряд других особенностей цифровой реализации, таких, например, как некратность интервала усреднения в цифровых интеграторах T_H периоду опорной частоты и др. Поэтому для оптимизации состава цифрового измерителя, выбора интервала усреднения квадратурных отсчетов цифровых сигналов T_H (интервала «вторичной» дискретизации), алгоритмов дискриминатора *Д*, структуры и коэффициентов петлевого фильтра разработаны алгоритмы и программы статистического синтеза, позволяющие оценить результаты аналитического метода путем имитационного моделирования на ЭВМ [7]. Они позволяют при разных отношениях сигнал/шум на входе системы синхронизации провести анализ работы как отдельных ее составных частей, так и замкнутой ЦСФС в целом, уточнить числовые значения параметров, полученных в результате аналитического синтеза, определить точность оценки параметров движения объектов цифровым измерителем, дать практические рекомендации для его реализации на современной элементной базе. Структурная схема модели ЦСФС представлена на рис. 2.

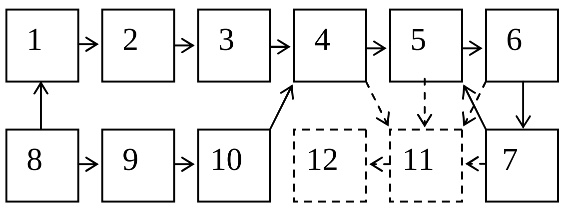

Рис.2. **Структурная схема модели ЦСФС, где:**
1 – модель входных сигналов, 2 – модель входных цепей, 3 – АЦКП, 4 – сумматор, 5 – модель дискриминаторов, 6 – модель петлевых фильтров, 7 – модель синтезатора, 8 – модель движения цели, 9 – модель формирователя отношения сигнал/шум, 10 – модель генератора шума, 11 – модель статистической обработки, оценки точности следящего измерителя, 12 – модель управляемой системы генерации графиков

Пунктирными линиями показаны блоки и связи модели, которые обеспечивают статистическую обработку и отображение полученных результатов моделирования.

Разработанные в [7] программы представляют собой математическую модель, алгоритмы работы которой задаются с помощью указателей модуля начальных условий программы и далее в процессе моделирования не меняются. В основу работы модели положен «цикл измерения» T_H – промежуток времени, за который формируется интервал накопления квадратурных составляющих входного допплеровского сигнала. По сути дела, на протяжении этого цикла формируется интервал «вторичной» дискретизации. В дальнейшем на кратных T_H временных интервалах формируются алгоритмы дискриминаторов и петлевого фильтра и определяется задержка сигнала управления цифровым синтезатором опорной частоты $Z_{\varphi_{вых\Sigma}}$ и квадратурных составляющих опорного сигнала относительно квадратурных составляющих входного сигнала.

Кроме функциональных элементов цифрового измерителя (аналого-цифрового квадратурного преобразователя (АЦКП), накопительных сумматоров, формирующих интервал T_H синтезатора опорной частоты, дискриминаторов и петлевого фильтра) программно реализованы математические модели следующих устройств:

- генератора входного сигнала;
- входных цепей, которые функционально и конструктивно предшествуют АЦП и формируют амплитудно-частотную характеристику аналогового тракта;
- управляемой системы генерации графиков, которая позволяет визуально отображать результаты моделирования;
- блока статистической обработки результатов и оценки характеристик точности измерителя.

Рассмотрим особенности реализации каждой их этих составных частей.

Генератор входного сигнала формирует выборку входного сигнала допплеровской частоты, в совокупности с эталонным гауссовским шумом.

Модель входного сигнала 1 в зависимости от заданной в 8 модели движения цели формирует в заданный момент времени значение допплеровского смещения частоты. Модель входных цепей 2 накладывает на сформированный в 1 сигнал ограничения, которые определяются амплитудно-частотной характеристикой предшествующего АЦП аналогового тракта. Формирователь входного отношения сигнал/шум 9 формирует значение этого отношения в заданный момент времени в зависимости от заданной в 8 модели движения цели. Полученное значение отношения сигнал/шум является условием запуска генератора шума 10 (генератора случайных чисел). Полученные в генераторе шума 10 числовые значения шума складываются в сумматоре 4 с квадратурными отсчетами допплеровского сигнала с выхода АЦКП 3 и усредненные на интервале T_H поступают на дискриминатор 5, на второй вход которого поступает сигнал с выхода синтезатора 7. Сформированный на выходе дискриминатора 5 сигнал рассогласования входного и опорного сигналов усредняется петлевым фильтром 6 и поступает на управляющий вход синтезатора 7.

Модели составных частей измерителя (дискриминатора, петлевого фильтра, синтезатора) представляют собой модули, функционирующие в полном соответствии с их физической реализацией в ПЛИС. Поэтому в модели эти модули работают как модули с фиксированной запятой, имеющие ограниченную разрядность. Ограничение разрядности в разработанной модели представлено как дополнительный шум, вносимый в конкретную точку вычислительного процесса. Поскольку в процессе моделирования генерируется значительный объем информации, управляемая система генерации графиков 12 позволяет управлять процессом сбора и визуализации информации о работе модели.

Система сбора и статистической обработки результатов 11 представляет собой математический аппарат, который позволяет оценить результаты моделирования числовыми величинами – математическим ожиданием, отклонением, дисперсией. Кроме того, на нее возложены функции формирования графиков конечных зависимостей. Например, зависимости величины отклика на выходе частотного дискриминатора от уровня сигнала на входе.

Выводы

Перспективным направлением в определении параметров движения в системах автономной навигации и баллистической подготовки артиллерийских систем являются цифровые измерители допплеровских РЛС на основе цифровой системы фазовой синхронизации. Проведенные исследования цифровых измерителей показали, что на сегодняшний день аналитические методы (выражения 1-8) позволяют определить лишь ориентировочные значения параметров цифрового измерителя.

В то же время методы имитационного моделирования ЦСФС позволяют произвести анализ работы как отдельных составных частей, так и замкнутой ЦСФС в целом, уточнить их параметры, полученные в результате аналитического синтеза, определить временные характеристики и точность оценки параметров движения в системах автономной навигации и баллистической подготовки артиллерийских систем.

Список литературы

1. Стрельба и управление огнем наземной артиллерии. – Военное издательство Министерства Обороны СССР. – Москва, 1976.

2. Бударецкий Ю.И. Особенности построения цифровых измерителей допплеровских РЛС для обеспечения артиллерийских систем навигационной и баллистической информацией / Ю.И. Бударецкий, С.А. Мартиненко, С.В.Таран // Матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції СПРТІ-2009. Частина 2. – Вініця, 2009. –96 с.

3. Стиффлер Дж. Дж. Теория синхронной связи. Пер. с англ. / Под ред. Э.М.Габидулина. – М.: Связь, 1975.

4. Шахгильдян В.В. Системы фазовой автоподстройки частот / В.В. Шахгильдян, А.А. Ляховкин // – М.: Связь, 1972.

5. Цифровые системы фазовой синхронизации / М.И. Жодзишский и др.; Под ред. М.И. Жодзишского. – М.: Сов.радио, 1980. – 208 с.

6. Бударецкий Ю.И. Анализ микропроцессорных систем синхронизации в импульсном приближении / Ю.И. Бударецкий, М.И. Жодзишский, И.А. Мымрин // Теоретическая электротехника. – 1989. – № 47. – с. 128-135.

7. Канінський В.А., Бударецький Ю.І., Грабчак В.І., Прокопенко В.В. Компьютерна програма «Програма визначення та оптимізації параметрів цифрового вимірювача на основі цифрових систем фазової синхронізації (ЦСФС). – Свідоцтво про реєстацію права на твір № 33794 від 21.08.2010 р.

Поступила в редакцию 9.11.2010 г.

Рецензент: доктор технических наук, старший научный сотрудник А.Н. Зубков, Академия сухопутных войск имени гетмана Петра Сагайдачного, Львов.

МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ЦИФРОВОГО ВИМІРЮВАЧА ДОППЛЕРІВСЬКИХ РЛС АРТИЛЕРІЙСЬКИХ СИСТЕМ

Ю.І. Бударецький, В.І. Грабчак, В.А. Канінський, В.В. Прокопенко

У статті розглянуті аналітичний метод і метод імітаційного моделювання оптимізації параметрів цифрового вимірювача допплеровських РЛС артилерійських систем. Розглянута структурна схема цифрової системи фазової синхронізації, представлені різницеві рівняння і передаточні функції, визначені умови її стійкості. Представлена імітаційна модель цифрової системи фазової синхронізації, яка дозволяє провести оптимізацію її параметрів, визначети часові характеристики і точність оцінки параметрів руху об'єктів для систем автономної навігації та балістичної підготовки артилерійських систем.

Ключьові слова: *цифрова система фазової синхронізації, аналітичні та імітаційні моделі*

METHODS OF OPTIMIZATION OF THE DIGITAL INSTRUMENT PARAMETERS OF THE ARTILLERY SYSTEMS DOPPLER RADARS

Y. I. Budaretskyi, V.I. Hrabchak, V.A. Kaninskyi, V.V. Prokopenko

The article presents the analytical methods and the method of the imitation modeling of the parameters of the Doppler radar of the artillery system optimization. The structural scheme of the digital system of the phase synchronizing is viewed; differential equations and transmission functions are presented and the terms of their stability are defined. Presented imitation digital model of the phase synchronization allows to perform the optimization of its parameters, defines its temporary characteristics and the accuracy estimation of the parameters of objects' movement for the system of autonomic navigation and ballistic preparation of the artillery system.

Key words: *digital system of the phase synchronization, analytical and imitation models*.