
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АППАРАТУРЫ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС

Реализация алгоритмов пространственно-временной обработки

© Авторы, 2015

© ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2015

В.С. Ефименко – д.т.н., профессор, начальник отдела НИР Департамента навигационных и связанных систем, ОАО «ВНИИР-Прогресс»

E-mail: vefimenko@abselectro.com

А.В. Пастухов – к.т.н., начальник отдела ОКР Департамента навигационных и связанных систем, ОАО «ВНИИР-Прогресс»

E-mail: apastukhov@abselectro.com

Д.Н. Ворончихин – мл. науч. сотрудник, Департамента навигационных и связанных систем, ОАО «ВНИИР-Прогресс»

E-mail: dvoronchikhin@abselectro.com

Представлены и обсуждены некоторые вопросы реализации оптимального пространственного фильтра – бимформера. Основное внимание уделяется вопросу вычислительной сложности этой проблемы. Рассмотрены возможные структуры бимформера и варианты их реализации с использованием различных аппаратных средств, дается примерная оценка сложности. Приведены возможные варианты реализации пространственных алгоритмов для случаев навигационной аппаратуры пользователя и системы связи.

Ключевые слова: пространственная обработка, бимформер, многоканальный компенсатор, реализация алгоритма, ПЛИС, процессор.

Some problems of optimal spatial filter (beamformer) implementation are discussed in the report. Most attention is paid to computational complexity aspect. Beamformer structures, implementation modification with various hardware devices and approximate computational complexity estimation is discussed. Two cases of spatial processing implementation in radio navigation and telecommunication are introduced.

Keywords: space adaptive processing, beamformer, multichannel canceller, algorithm implementation, FPGA, processor.

Достижение высокого уровня подавления помех «автокомпенсаторов» потребовало специальных теоретических и экспериментальных исследований. В результате в реальном малогобаритном устройстве с 4-элементной антенной решеткой удалось достичь уровня подавления помех ~50..55 дБ [1].

Преимущества алгоритмов с фокусировкой антенной решетки (АР)

- Обеспечиваемый выигрыш мало зависит от условий помеховой обстановки, в частности, он обеспечивается как при наличии, так и при отсутствии помех.
- Обеспечиваемое фокусировкой повышение ОСШ вполне сравнимо с выигрышем за счет методов повышения помехозащищенности, реализуемых, например, в самих приемниках ГНСС (некогерентные или одноэтапные алгоритмы, инерциальная поддержка и др.).
- Основные затраты на реализацию алгоритмов фокусировки сводятся к увеличению только числа цифровых корреляторов, что в современных специализированных интегральных схемах не представляет особых проблем.
- В радионавигации фокусировка обеспечивает существенное увеличение среднего числа непораженных помехой направлений на спутники.
- БФ обеспечивает уменьшение влияния многолучевости, не искажает фазу полезного сигнала и является важнейшим элементом помехоустойчивости угломера.

Проблемы реализации адаптивного формирователя лучей (АФЛ) по большей части лежат в области цифровых технологий, требования к которым существенно выше тех, что предъявляет реализация автокомпенсатора.

Основное внимание уделено рациональному представлению оптимального пространственного фильтра и блока режекции помех и вычислительным аспектам реализации АФЛ.

Оптимальный алгоритм пространственной обработки. АФЛ [2], или бимформер, – с точностью до константы сводится к формированию взвешенной (с весом β) суммы выходов ξ_i элементов АР:

$$\gamma_t = \beta^H \xi_t = c \mathbf{H}^H (\mathbf{N}^{-1} \xi_t), \quad (1)$$

где γ_t – выход АФЛ; $\mathbf{N} = M \{ \xi_{t_i} \xi_{t_j}^H \}$ – эрмитова матрица корреляций выходов антенной решетки; \mathbf{H} – вектор, описывающий амплитудно-фазовое распределение полезного сигнала на антенных элементах; $(\cdot)^H$ – операция эрмитова сопряжения.

Алгоритм АФЛ получен из синтеза по критерию, связанному с информационными параметрами. Однако такой же, как у АФЛ вектор весовых коэффициентов можно получить, используя метод наименьших квадратов:

$$\beta = \min^{-1} |\beta^H \xi_t|^2 \text{ при ограничении } \beta^H \mathbf{H} = 1. \quad (2)$$

Отсюда – между АК и АФЛ пропасти нет, поскольку для АК

$$\beta = \min^{-1} |\beta^H \xi_t|^2 \text{ при ограничении } \beta_1 = 1. \quad (3)$$

Главные составляющие алгоритма АФЛ (рис. 1)

- Режекция помехи, отражаемая в выражении (1) умножением вектора наблюдения с выходов АР на матрицу \mathbf{N}^{-1} , содержащую все пространственные характеристики помехи:

$$\eta_t = \mathbf{N}^{-1} \xi_t. \quad (4)$$

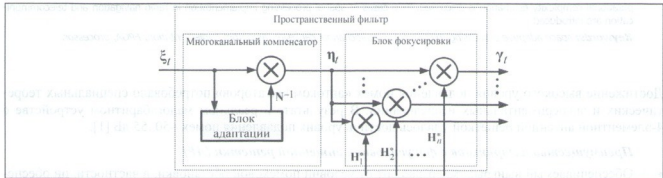


Рис. 1. Схема АФЛ

- Выход η_t содержит столько же очищенных от помех компонент, каково число элементов АР.
- Объединение элементов полезного сигнала, содержащихся во всех компонентах $\mathbf{N}^{-1} \xi_t$. Эта составляющая осуществляется умножением η_t на вектор \mathbf{H}^H , эрмитово сопряженный множителю \mathbf{H} во входном наблюдении и обеспечивающий равенство фаз полезных сигналов при сложении. В пространстве такое когерентное сложение эквивалентно фокусировке антенны в направлении на источник излучения полезного сигнала.

Матрица \mathbf{N}^{-1} практически во всех радиотехнических задачах неизвестна и должна оцениваться в блоке адаптации. При условии, что нам известны векторы \mathbf{H}_i (что характерно для задач радионавигации), вся адаптация сводится к оценке матрицы \mathbf{N}^{-1} . В случае стационарной (квазистационарной) помеховой ситуации алгоритм вычисления \mathbf{N}^{-1} фактически сводится к прямому накоплению матрицы помех и ее обращению.

Преимущество представления с выделением многоканального компенсатора (МКК) связано с необходимостью для приемников одновременного приема множества полезных сигналов. На схеме это приводит только к размножению блоков фокусировки для различных H_i , соответствующих различным источникам сигнала. При этом первый, наиболее сложный, блок режекции помех – блок МКК – оказывается общим. Важно отметить, что МКК не зависит от полезного сигнала и может быть реализован в виде отдельного модуля.

Задачи, возникающие в процессе реализации БФ. Эти задачи связаны с цифровой реализацией в реальном времени матричных операций типа решения систем линейных уравнений и обращения матриц.

Современная вычислительная линейная алгебра – бурно развивающаяся наука. Главная проблема, рассматриваемая ею, – это проблема решения систем линейных уравнений. В настоящее время разработано множество методов, упрощающих эту задачу, которые, в частности, зависят от структуры матрицы системы. Большинство методов основано на представлении матрицы в виде произведения других матриц специального вида или матричных разложениях. Как правило, после определенного разложения матрицы задача линейной алгебры существенно упрощается.

Реализация на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) предполагает вычисления на основе представления чисел в формате фиксированной точки, что существенно затрудняет решение задач пространственной обработки на основе обычных вычислительных методов и заставляет искать устойчивые в вычислительном плане алгоритмы. Для реализации желательно использовать алгоритмы, допускающие возможность параллельных (конвейерных) вычислений.

Реализация алгоритма АФЛ. Главное внимание будем уделять наиболее трудоемкой части БФ – МКК.

Считая, что наблюдение осуществляется на интервале стационарности ($t = 1, \dots, T$) помеховой ситуации, введем матрицу наблюдений $y = (\xi_1 \ \xi_2 \ \dots \ \xi_T)$ и матрицу выходов МКК $z = (\eta_1 \ \eta_2 \ \dots \ \eta_T)$. Тогда из выражения (4) следует, что матрица z может быть получена как решение матричного уравнения

$$Nz = y. \quad (5)$$

В схеме, показанной на рис. 2, операции с повышенными требованиями к быстродействию – накопления матрицы $N = \sum \xi_i \xi_i^H$ и пространственной фильтрации $\eta_i = N^{-1} \xi_i$ – рационально поручить ПЛИС, а матричное обращение (его можно выполнять один раз в 1...10 мс) передать встроенному в ПЛИС или внешнему процессору.

Операцию обращения матрицы N можно выполнять и на ПЛИС, однако представленные далее схемы в большей степени приспособлены для этого, поскольку позволяют обойтись не только без накопления матрицы N , но и без ее обращения.

Если заменить матрицу N ее максимально правдоподобной оценкой $N = \sum \xi_i \xi_i^H = yy^H$, станет понятно, что (5) относится к так называемым системам нормальных уравнений, поскольку (5) принимает вид

$$yy^H z = y. \quad (6)$$

Используем QR-преобразование, основанное на возможности представления произвольной матрицы в виде произведения матрицы Q и верхней треугольной матрицы R , т.е. $y^H = QR$, $Rz = Q^H y$. Структура, представленная на рис. 3, применима, если краевые эффекты в QR-преобразовании не вносят существенного искажения в результат вычисления матрицы Q , что справедливо, например, при использовании в QR экспоненциального окна.

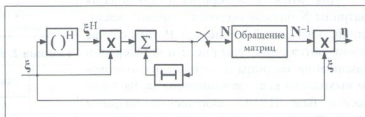


Рис. 2. Схема МКК с накоплением и обращением матрицы N

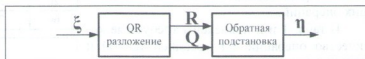


Рис. 3. Первый вариант структуры МКК без накопления матрицы

При выполнении преобразований промежуточным результатом является уравнение $R^H R z = y$, которому соответствует структура на рис. 4.

Блоки прямой и обратной подстановки – эффективная реализация решения системы линейных уравнений для нижней и верхней треугольных матриц соответственно.

Реализация АФЛ на современной элементной базе. Она возможна в нескольких вариантах, например, рис. 5, а и б.

В принципе, возможно также использование ASIC – наиболее компактного решения, но этот вариант может быть слишком дорогим для небольшой серии.

Варианты реализации. Для удобства расчета и описания были выбраны следующие аппаратные и программные средства (бюджетный вариант разработки фирмы Altera 2–4-хлетней давности [3]): ПЛИС Altera Cyclone V 5CEFA9F2317; программный процессор Nios для Cyclone V; аппаратный процессор ARM Cortex-A9.

Для МКК с алгоритмом накопления матрицы N больше подходит вариант реализации, показанный на рис. 5, б. В этом случае реализуются структуры рис. 3 и 4. Операции накопления матрицы и вычисления итогового выходного вектора выполняются на логической базе ПЛИС. Обращение матрицы осуществляется в процессоре с последующим возвращением результата для дальнейших операций.

В табл. 1 и 2 приведены требуемые количество операций с плавающей точкой и время выполнения в аппаратном (ARM) и программном (Nios) процессорах для заданных математических функций [5].

МКК, соответствующий рис. 3 и 4, реализуем полностью на ПЛИС. Для эффективного выполнения алгоритма необходимо использовать систолический вариант QR-разложения с использованием вращений Гивенса (рис. 6), обеспечивающий обновление решений в темпе поступлений входных отсчетов сигнала. Схема, изображенная на рис. 6, основана на использовании двух типов процессорных элементов. В граничном процессоре ГП выбираются параметры вращения входного двухкомпонентного вектора, необходимые для обнуления его второй компо-

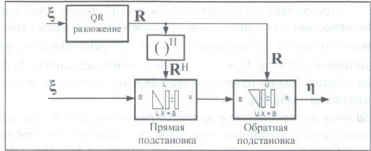


Рис. 4. Второй вариант структуры МКК без накопления матрицы

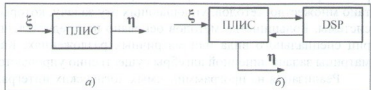


Рис. 5. Реализация АФЛ «полностью на ПЛИС» (а) и «на ПЛИС и процессоре» (б)

Таблица 1. Количество операций

Математическая функция	Количество операций в ARM (флопов)	Количество комплексных операций в Nios	
		KC	KY
Разложение Холецкого	$4M^2/3$	$M^3/6$	$M^3/6$
Прямая или обратная подстановка	$4M^2$	$M^2/2$	$M^2/2$

Таблица 2. Время выполнения операций, мкс

M	Разложение Холецкого		Прямая и обратная подстановки (в сумме)	
	ARM	Nios	ARM	Nios
4	0,21	5,0	0,32	7,5
20	26,7	622,2	8	186,7
60	720	16800	72	1680

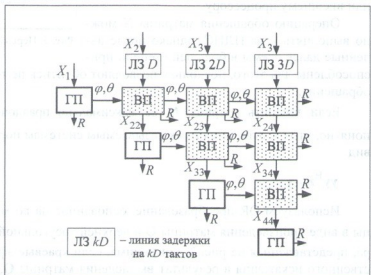


Рис. 6. Систолическая схема QR алгоритма

ненты. Внутренний процессорный элемент ВП осуществляет поворот на вычисленные ГП углы.

Преобразование Гивенса обладает хорошими свойствами для применения в треугольном систолическом массиве, состоящем из двух типов элементов, называемых *граничной* и *внутренней ячейками*. Элементы, на которых происходит вращение, – x и R , где x – входное значение ячейки, а R – значение, которое содержится в памяти этой ячейки. Параметры вращения вычисляются в граничной ячейке так, что входное значение x этой ячейки обнуляется, а значение R обновляется в соответствии с этим вращением и сохраняется для следующей итерации. Параметры вращения затем проходят по всем остальным внутренним ячейкам (в виде квадрата) строки, продолжая вращение.

Для цифровой реализации на ПЛИС, как правило, представляющих числа с фиксированной точкой, можно организовать так называемый CORDIC-процессор, принцип функционирования которого в использовании итерационного алгоритма на базе операций сдвига и сложения.

Задача реализации АФЛ для приема сигналов ГНСС. Это совершенно естественная и относительно простая задача. Во-первых, в навигационных задачах известно направление на спутники и по ним можно рассчитать необходимые для фокусировки векторы \mathbf{H} . Во-вторых, сигнально-помеховая обстановка изменяется относительно медленно, поэтому требования к быстродействию аппаратных средств не слишком высокие.

Первый вариант реализации АФЛ для приемника ГНСС соответствует схеме, показанной на рис. 2, с накоплением матрицы и пространственной фильтрацией на ПЛИС и обращением матрицы на процессоре. Задержка в вычислении \mathbf{N}^{-1} фактически включает интервал накопления T и время на обращение матрицы и определяет допустимую динамику носителя приемника. Для малоподвижных объектов экономия ресурсов ПЛИС возможна за счет уменьшения темпа поступления выборки для накопления матрицы.

О задержке на операцию обращения можно судить по табл. 3.

Таблица 3. Данные о выполнении операций в процессорах для разной размерности входного вектора M

Операция	M	Число тактов	Время выполнения, нс	Количество требуемых умножителей
Формирование матрицы (ПЛИС)	4	5	35	30
	20	15	100	60
	60	35	250	180
Обращение матрицы (процессор)	4	205	530	–
	20	13827	34700	–
	60	316680	792000	–
Умножение $\mathbf{N}^{-1}\xi$ (ПЛИС)	4	6	40	48
	20	30	220	60
	60	70	470	180

Для динамичных объектов возможен вариант реализации МКК без накопления матрицы (рис. 3 и 4). Если для систолического блока QR использовать экспоненциальное окно, тогда предпочтительна более экономичная схема (рис. 3). Для блоков подстановки также следует использовать систолическую структуру.

Системы связи с ППРЧ. Для этих систем большая часть проблем и их возможных решений в технической реализации алгоритма АФЛ близка решенным для БФ ГНСС.

Условия, характерные для технической реализации

- Наличие дефицита как времени наблюдения (или объема входных отсчетов сигнала), так и времени обработки (или задержки выдачи сформированных выходов корреляторов).
- Большой динамический диапазон сигнала.

- Фокусировка на источник сигнала в связанном приемнике крайне желательная из-за высокой вероятности режекции сигнального направления.
 - Фокусировка должна осуществляться при неизвестном направлении на источник сигнала.
- Для условий системы связи с ППРЧ использован специально синтезированный оптимальный алгоритм ПВОС [4], обеспечивающий минимальную вероятность ошибки оценки приема цифрового сигнала. Его реализация с использованием QR-преобразования возможна в виде структуры, показанной на рис. 7.

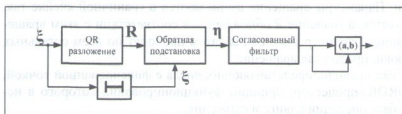


Рис. 7. Структура АФЛ для системы связи с ППРЧ

фиксированной точкой $s_{fix}(18,6)$, число итераций CORDIC – 10. При этом общая задержка при реализации четырехэлементной антенной решетки без временных отводов составила ~20 мкс при загрузке ПЛИС ~50%.

Дополнительный выигрыш в помехоустойчивости за счет такого АФЛ составляет 25...30 дБ. Опыт реализации антенных компенсаторов следует использовать при реализации бимформеров. Основные трудности реализации АФЛ связаны с цифровой частью. Возможность различных интерпретаций оптимальных пространственных фильтров позволяет гибко подходить к выбору аппаратной платформы для реализации АФЛ. Реализация АФЛ для приемников ГЛОНАСС вполне возможна на элементной базе типа разработок фирмы Altera 2-х–4-хлетней давности.

Литература

1. Харисов В.Н., Ефименко В.С., Осаняся А.А. и др. Оценка характеристик подавления помех приемником ГНСС с антенными решетками в реальных условиях // Радиотехника. 2013. № 7. С. 132–136.
2. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. Изд-е 4-е, перераб. / Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. М.: Радиотехника, 2010.
3. An Independent Analysis of Floating-point DSP Design Flow and Performance on Altera 28-nm FPGAs // Berkeley Design Technology, Inc. 2013. http://www.bdti.com/MyBDDT/pubs/2012_Altera_FloatingPoint_Design.pdf.
4. Ефименко В.С., Харисов В.Н. Алгоритмы оптимальной фильтрации при пространственно-многоканальном приеме в условиях быстрых изменений сигнально-помеховой ситуации // Радиотехника. 1992.
5. Golub G.H., Van Loan C.F. Matrix computations. 2nd ed. Johns Hopkins Series in the Mathematical Sciences. V. 3. Johns Hopkins University Press. Baltimore, MD. 1989.

ВНИМАНИЕ!

В Издательстве «Радиотехника» вышла в свет книга

Радиоавтоматика

Авторы

А.И. Перов, В.Н. Замолдчиков, В.М. Чиликин

Изложены принципы действия, способы математического описания, методы анализа качества работы и синтеза систем радиоавтоматики. Рассмотрены структурные схемы. Дан анализ устойчивости, точности непрерывных и дискретных систем радиоавтоматики. Большое внимание уделено математическому описанию и структурным схемам непрерывных и дискретных систем методами пространства состояний. Весь теоретический материал подкреплён примерами и контрольными вопросами.

Для студентов, обучающихся по направлению подготовки специалистов 210601 «Радиоэлектронные системы и комплексы» и направлению подготовки бакалавров 210400 «Радиотехника», а также для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием систем радиоавтоматики.

По вопросам заказа и приобретения книги обращаться в Издательство «Радиотехника» по адресу:

107031, Москва, К-31, Кузнецкий мост, д. 20/6,
тел./факс: (495) 625-78-72, 621-48-37, 625-92-41
<http://www.radiotec.ru>, e-mail: info@radiotec.ru

Радиолокация
и радиометрия

Методы и средства
оптоэлектроники
в радиофизике

Системы
радиоуправления

Антенны и техника СВЧ

Робототехника

Биомедицинская
электроника

Технологии
живых
систем

Новые
информационные
технологии

Нейрокомпьютинг

Нанотехнологии

Информационные
и измерительные
системы

Радионавигационные технологии



УДК 629.78
ББК 39.67
П 15

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СЕРИИ

Редакционный совет:

д.ф.-м.н., проф. О.В. Бешкий, акад. Ю.В. Гуляев, д.т.н., проф. А.Ю. Гринев, д.т.н., проф. Ю.Л. Козирацкий, д.т.н., проф. Г.С. Кондратенков, д.т.н., проф. А.В. Коренной, д.т.н., д.б.н. И.В. Матвейчук, д.т.н., проф. В.И. Меркулов, д.т.н., проф. А.И. Перов, к.б.н. А.В. Савельев, акад. А.С. Сигов, д.т.н. проф. М.С. Ярылков

Выпуск 4

Серия «Радиосвязь и радионавигация»

Рецензент:

докт. техн. наук, профессор *В.Н. Харисов* (ОАО «ВНИИР Прогресс»)

П 15 Радионавигационные технологии. Сб. статей. / Под ред. *А.И. Перова*. – М.: Радиотехника, 2015. – 144 с.: ил. Научно-технические серии. Вып. 4. Серия «Радиосвязь и радионавигация». (Авторы указаны на с. 144)

ISBN 978-5-93108-096-3

Отражены теоретические вопросы спутниковой навигации, технологии перспективной системы ГЛОНАСС, показаны результаты экспериментальных исследований технологий спутниковой навигации; рассмотрены вопросы мониторинга навигационных сигналов; даны приложения технологий спутниковой навигации в различных областях. Книга подготовлена по материалам научно-технической конференции «Радионавигационные технологии в приборостроении» (сентябрь 2014 г.).

Для научных работников и инженеров, а также преподавателей и студентов вузов.

УДК 629.78
ББК 39.67

ISBN 978-5-93108-096-3

© Авторы, 2015

© ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2015