

средства ориентироваться на трассе, удерживать автомобиль на полотне дороги и определять безопасное направление движения.

В данной работе проводится сравнение энергетических характеристик РЛС с импульсным и непрерывным излучением, обосновывается необходимость применения непрерывного зондирующего сигнала с частотной модуляцией, позволяющего повысить энергетический потенциал мобильной РЛС и тем самым сформировать радиолокационные изображения, обладающие достаточной информативностью. Основными техническими характеристиками АРЛС являются:

- Мощность передатчика $P_{\text{ПРД}} \leq 100$ мВт.
- Диапазон частот (длин волн) $f = 40$ ГГц ($\lambda \approx 8$ мм).
- Коэффициент усиления антенны $G_{\text{АНТ}} = 400$.
- Угол облучения цели, угол визирования $\beta_0 = 0.14$ рад или 8° .
- Ширина ДН азимутальная $\Delta\alpha = 0.0174$ рад или 1° .
- Сектор переднего обзора $\pm 15^\circ$.
- Коэффициент шума приемника $N_d = 10$.
- Температура окружающей среды $T_\Sigma = 300$ К.
- Длительность зондирующего импульса $\tau_{\text{имп}} = 40$ нс.

В качестве параметра, характеризующего энергетику радиолинии, будем использовать отношение сигнал / шум на выходе устройства обработки. Отношение С/Ш будет определяться по формуле

$$q = \frac{P_{\text{ПРМ}}}{P_{\text{Ш}}} = \frac{P_{\text{ПРД}} \cdot G_{\text{АНТ}}^2 \cdot S_{\text{эф}} \cdot \lambda^2 \cdot \eta^2}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot R^4 \cdot (k \cdot T_\Sigma \cdot \Delta f_{\text{ш}} \cdot N_d)} \quad (1)$$

где $S_{\text{эф}}$ – эффективная поверхность отражения, которая для точечных целей (автомобиль, малоразмерные препятствия и др.) может изменяться от 1 м^2 (велосипедист) до 20 м^2 (большегрузный автомобиль);

$$\Delta f_{\text{ш}} = \frac{1}{\tau_{\text{имп}}} = \frac{1}{40 \cdot 10^{-9}} = 25 \text{ (МГц)} - \text{полоса приемника.}$$

Для протяженных поверхностей (обочина, прилегающая местность и т.д.) $S_{\text{эф}}$ определяется выражением:

$$S_{\text{эф}} = \sigma_0 \cdot \frac{c\tau}{2} \cdot \frac{\Delta\alpha}{\cos \beta_0} \cdot R, \quad (2)$$

где σ_0 – коэффициент рассеяния; R – расстояние до цели. Коэффициент рассеяния σ_0 для гравийной, асфальтовой, бетонной поверхности изменяется от -20 до -40 дБ. Отношение сигнал шум на входе радиолокационного приемника определяется по формуле (1), где $S_{\text{эф}}$ определяется по формуле (2).

При построении РЛС с непрерывным ЛЧМ сигналом на выходе балансного смесителя формируется информационный сигнал-сигнал биений, который представляет собой квазигармоническое колебание с частотой f_b и длительностью приблизительно равной периоду модуляции исходного ЛЧМ сигнала. Поэтому можно рассчитать сигнал / шум как функцию периода повторения (частоты модуляции).

Рассчитаем сигнал / шум на выходе устройства обработки (1), где $\Delta f_{\text{ш}} = (1/T_M) = F_M$. При увеличении частоты повторения увеличивается мощность шумовой составляющей входного сигнала, т.к. возрастает $\Delta f_{\text{ш}} = F_M$. Отношение сигнал / шум при локации протяженной поверхности определяется по формуле (1), где $S_{\text{эф}}$ зависит от разрешающей способности зондирующего сигнала по дальности и угловым разрешением ДН и определяется по формуле (4). При девиации частоты 100 МГц разрешение РЛС составляет 1.5 метра по формуле (3)

$$\delta R = (c/4W); \quad (3)$$

$$S_{\text{эф}} = \sigma_0 \times \Delta\alpha \times 1.5. \quad (4)$$

На завершающем этапе работы были построены графики зависимости отношения сигнал/шум от расстояния для точечных целей с $S_{\text{эф}} = 1, 5, 20 \text{ м}^2$ и протяженных целей с $\sigma_0 = 0.01, \sigma_0 = 0.001, \sigma_0 = 0.0001$ ($-20, -30, -40$ дБ) для импульсного зондирующего сигнала. Аналогичные графики были построены для непрерывного частотно-модулированного сигнала с частотой повторения ЛЧМ сигнала 20 кГц.

На основании полученных графических результатов, был сделан вывод, что применение непрерывного ЛЧМ сигнала позволило увеличить сигнал / шум на несколько порядков по сравнению с импульсным сигналом, поэтому малоразмерные цели и протяженные цели могут эффективно обнаружиться, т.е. сигнал / шум будет больше 10 .

Таким образом, проведенные исследования показали необходимость применения непрерывного ЛЧМ сигнала в автомобильной РЛС. Применение непрерывного ЛЧМ сигнала позволит эффективно обнаруживать обочину с различными отражающими свойствами. Причем для бетонной обочины дальность обнаружения составляет 50 м, асфальтовой 100 м, гравийной 200 м. Обнаружение точечных целей возможно на дальностях более 500 м.

Литература

1. Випицкий А.С. Автономные радиосистемы. - М.: Радио и связь, 1986.
2. Жуковский А.П. Теоретические основы радиовысотометрии. - М.: Советское радио, 1979.
3. Краснюк Н.И., Коблов В.А., Краснюк В.Н. Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС. - М.: Радио и связь, 1988.

Клюев С.Ю., Кузнецов Ю.В.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА Е – ИМПУЛЬСА

Появившийся в последнее время интерес к идентификации и различению радиолокационных объектов по сигналам собственных электромагнитных излучений способствовал разработке ряда новых методов идентифика-

ции, которые условно можно разделить на параметрические и непараметрические. Традиционные параметрические методы достаточно хорошо изучены и основываются на определении конечного числа параметров, характеризующих объект. В то же время в литературе широко обсуждаются и представляют интерес непараметрические методы идентификации, к которым можно отнести метод Е - импульса (extinction-pulse – гасящий импульс), возможности и эффективность работы которого представлены в данной работе.

Как известно, измеренная поздневременная реакция проводящей радиолокационной цели $y(t)$ может быть представлена в виде суммы затухающих гармонических колебаний, характеризующихся расположением полюсов p_i на комплексной плоскости [1]:

$$y(t) = \sum_{i=1}^M b_i e^{p_i t}, \quad 0 \leq t \leq T_y, \quad (1)$$

где $p_i = \sigma_i + j\omega_i$, $i = 1, 2, \dots, M$ – резонансные полюса цели; σ_i – коэффициент затухания i -й компоненты; ω_i – резонансная частота; b_i – комплексные вычеты; M – число доминирующих резонансов.

Суть метода Е - импульса заключается в подборе к отклику цели $y(t)$ некоторого дискриминационного сигнала конечной длительности (Е - импульса), который в общем случае можно записать как [2]:

$$e(t) = \sum_{n=0}^N e_n h(t - nT_h) = \sum_{n=0}^N e_n \delta(t - nT_h) * h(t), \quad (2)$$

где $\delta(t)$ – дельта-функция; T_h – длительность элементарного импульса в составе Е - импульса; $n = 0, \dots, N$ – количество элементарных импульсов; $h(t) = 0$ для $t \leq 0$ и $t > T_h$; e_n – амплитуда элементарного импульса.

Параметры Е - импульса выбираются так, чтобы свертка отклика цели с подобранным к нему Е - импульсом равнялась нулю на интервале $T_e \leq t \leq T_y$, являющимся поздней по времени частью свертки:

$$c(t) = e(t) * y(t) = 0, \quad (3)$$

где T_e – длительность Е - импульса; T_y – длительность исследуемого сигнала $y(t)$. Если провести операцию свертки этого Е - импульса с откликом от другой цели, то результат свертки будет представлять собой некоторую детерминированную функцию, отличную от нуля.

Подставив выражения (1) и (2) в (3) и решив полученное уравнение относительно коэффициентов e_n , можно получить требуемые значения амплитуд элементарных импульсов. Длительность элементарного импульса T_h рекомендуется выбирать кратной $T_h = r\pi/\omega_i$ (ω_i – самая высокая резонансная частота в отклике цели, $r = 1, 2, 3, \dots$), а длительность всего Е - импульса выбирается исходя из низкочастотных составляющих спектра отклика.

В качестве параметра, оценивающего качество свертки (3), будем использовать дискриминационное число Е - импульса Ψ :

$$\Psi = \frac{\int_{T_e}^{T_y} C(t)^2 dt}{\int_0^{T_e} e(t)^2 dt}, \quad (4)$$

где Ψ представляет собой отношение энергии нормированной поздневременной части свертки к энергии нормированного Е - импульса.

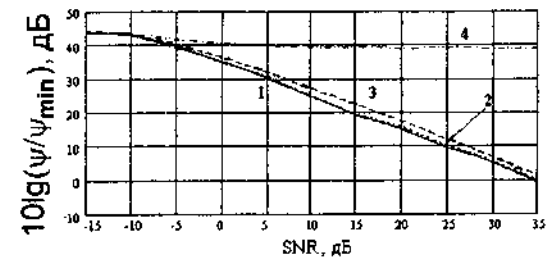
На основе результатов исследований масштабных макетов самолетов Boeing 707 и F-18 размерами 33 и 38,5 см, проведенных Мичиганским Университетом [3], были получены компьютерные модели откликов этих макетов. Далее для каждого из них были подобраны соответствующие дискриминационные сигналы (Е - импульсы).

Исследования представленного метода заключались в изучении эффективности его работы при изменении ракурса цели и при разных отношениях сигнал/шум. При этом аддитивный шум $n(t)$ представлял собой “белый” гауссовский шум, ограниченный по полосе, а отношение сигнал/шум оценивалось традиционным образом:

$$\text{SNR} = 10 \cdot \lg \frac{M \{x^2(t)\}}{M \{n^2(t)\}}, \quad (5)$$

где $M\{\bullet\}$ – математическое ожидание.

В процессе исследования метода Е - импульса проводилось моделирование изменения ракурса целью, заключающееся в выборе случайным образом амплитуд и начальных фаз компонент сигнала, с одновременной оценкой дискриминационного параметра при различных отношениях сигнал/шум. Результаты проведенных исследований представлены на рисунке.



Зависимость дискриминационного параметра от отношения сигнал/шум для модели сигнала В-707 (1 - свертка Е - импульса с исходной моделью сигнала; 2 - свертка Е - импульса с моделью при произвольных начальных фазах компонент сигнала; 3 - свертка Е - импульса при различных амплитудах компонент сигнала; 4 - свертка Е - импульса с моделью отклика другого макета самолета)

Из рисунка видно, что кривые 2 и 3, соответствующие моделям с измененными начальными фазами и амплитудами, практически неотличимы от кривой 1, соответствующей случаю свертки Е - импульса, выбранного для модели сигнала В-707, с исходной моделью В-707. Из этого можно сделать вывод о том, что изменение ракурса цели практически не влияет на

значение дискриминационного параметра. Из полученных результатов следует, что рассматриваемый метод позволяет эффективно проводить идентификацию объектов вплоть до отношения сигнал/шум 5 дБ.

Из кривой 4 видно, что в случае свертки E - импульса, выбранного для модели сигнала В-707, с моделью отклика от макета F-18 дискриминационный параметр принимает максимальное значение, практически не изменяя его в зависимости от отношения сигнал/шум.

По результатам проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что метод E - импульса является достаточно эффективным способом идентификации объектов по их собственным электромагнитным излучениям. Представленный метод практически инвариантен к ракурсу цели и позволяет успешно проводить идентификацию в сложной обстановке с помехами. Рассмотренный дискриминационный параметр позволяет эффективно автоматизировать процесс идентификации объектов.

Литература

1. Баум К.Э., Новые методы нестационарного (широкополосного) анализа и синтеза антенн и рассеивателей // *ТИИЭР*. Т. 64. № 11. 1976.
2. Yingbo Hua, Tapan K. Sarkar. A Discussion of E-Pulse Method and Prony's Method for Radar Target Resonance Retrieval from Scattered Field // *IEEE. Trans. Antennas Propagat.* Vol. 37. №. 7. July 1989.
3. E. Rothwell, D. P. Nyquist, K. M. Chen and B. Drachman. Radar Target Discrimination Using the Extinction-pulse Technique // *IEEE Trans. Antennas Propagat.* Vol. AP-33. №. 9. Sept. 1985.

Нагаев С.В., Тихонов В.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В АЛГОРИТМАХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Необходимость производства для гражданского рынка дешевых, надежных, малогабаритных, с малым энергопотреблением навигационных систем ускорили в последние годы разработку миниатюрных инерциальных датчиков, а также навигационных систем на их основе. Использование таких датчиков позволяет на один-два порядка уменьшить массогабаритные характеристики (размеры датчиков изменяются от долей до десятков мм), энергопотребление (порядка ватта) и цену. Но при этом микромеханические инерциальные датчики являются достаточно грубыми (точность гироскопов - хуже 0.1 град/ч, точность акселерометров - хуже 10^{-4} g). Поэтому особую важность получает разработка способов повышения точности навигационных систем, построенных на основе миниатюрных инерциальных датчиков.

Одним из таких способов является использование нейронных сетей в алгоритмах работы микромеханической инерциальной навигационной системы (МИНС). Использование нейросетей основано на ее способности воспроизводить (интерполировать) произвольную многомерную функцию,

обучившись на конечном числе примеров. Нейросетевая аппроксимация выгодно отличается от традиционных методов, таких как многочлены, тригонометрические функции, сплайны, неограниченностью размерности задачи и гарантированной гладкостью решения благодаря гладкости передаточных функций нейронов.

Применение нейронных сетей в навигации позволяет решать такие задачи, как: аппроксимация нелинейных алгоритмов функционирования подсистем навигационных комплексов; компенсация погрешностей навигационных комплексов в нелинейных алгоритмах. Для этого при обучении нейросети на ее вход подаются векторы, сформированные из измеренных значений навигационных параметров, содержащих ошибки измерения. Выход нейросети настраивается на точные значения параметров навигации, получаемые от более точного, чем ИНС, измерителя, например, спутниковой навигационной системы. Таким образом, использование нейросетей позволяет учитывать инструментальные погрешности гироскопов и акселерометров с любой наперед заданной точностью.

Для реализации такого подхода была разработана модель МИНС, построенная на двух нейронных сетях. Первая нейронная сеть аппроксимирует уравнения ориентации, записанные с помощью аппарата кватернионов, на шаге интегрирования и компенсирует инструментальные погрешности гироскопов. Вторая нейронная сеть аппроксимирует уравнения навигации, записанные в полусвязанной системе координат, на шаге интегрирования и компенсирует инструментальные погрешности акселерометров.

Обе нейронные сети являются двухслойными сетями прямого распространения, так как они отличаются простотой построения и хорошей сходимостью алгоритмов настройки. Скрытый слой состоит из нейронов с передаточной функцией тангенциальной сигмоиды, а выходной слой состоит из линейных нейронов. Этот выбор обусловлен тем, что такая сеть позволяет аппроксимировать любую нелинейную функцию, используя при этом произвольное количество нейронов скрытого уровня.

Для обучения нейронных сетей использовался алгоритм обратного распространения ошибки и его разновидность - метод Левенберга-Маркварта, так как он показывает наилучшую сходимость и не требует больших вычислительных затрат. Функционирование разработанной модели осуществляется в трех режимах:

1. *Подготовка к движению.* В этом режиме нейронные сети настраиваются на обучающей выборке, включающей известные координаты и реальные измерения гироскопов и акселерометров, т.е. нейросеть адаптируется к погрешностям МИНС;
2. *Режим работы с использованием приемника СНС.* В этом режиме производится коррекция показаний МИНС от приемника СНС путем дообучения нейронных сетей для компенсации погрешностей МИНС;
3. *Пропадание сигнала от СНС.* В этом режиме при пропадании сигнала от приемника СНС нейросети выдают навигационные параметры исходя из