

Радиофотонный метод определения угла прихода на основе ЛЧМ-сигнала

Викулов К.В.

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ

420111, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

E-mail: vikulov0@mail.ru

В докладе представлен радиофотонный метод определения угла прихода сигнала на основе тандемной амплитудно-фазовой модуляции (ТАФМ) с использованием ЛЧМ-сигнала. Проведено имитационное моделирование работы схемы для фазовых сдвигов от -120° до 120° , включая случай с дополнительным фиксированным сдвигом 90° для устранения неоднозначности измерений. Результаты подтверждают возможность однозначного определения угла прихода как для одного, так и для нескольких воздушных объектов при различных частотах зондирующего сигнала.

Ключевые слова: угол прихода, тандемная амплитудно-фазовая модуляция, линейная частотная модуляция.

Radio-photonic method for angle of arrival determination based on LFM signal

Vikulov K.V.

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI

The report presents a radio-photonic method for determining the angle of arrival based on tandem amplitude-phase modulation (TAPM) using a linear frequency-modulated (LFM) signal. Simulation modeling of the scheme was carried out for phase shifts ranging from -120° to 120° , including the case with an additional fixed 90° shift to resolve measurement ambiguity. The results confirm the possibility of unambiguous angle-of-arrival determination for both single and multiple aerial targets at different probe signal frequencies.

Keywords: angle of arrival, tandem amplitude-phase modulation, linear frequency modulation.

Введение

На сегодняшний день угол прихода является важным параметром радиолокационных систем обнаружения воздушных объектов. Для более точного определения данного параметра применяются радиофотонные методы. Однако большинство схем реализуются на модуляторах Маха-Цендера. Они не имеют возможности достаточно сильно подавлять несущую оптического сигнала, что снижает точность выходных результатов. Соответственно, развитие других систем на базе предыдущей работы также будут иметь похожие проблемы. Именно эти проблемы и определяют актуальность настоящей работы, направленной на развитие и усовершенствования радиофотонных систем обнаружения воздушных объектов на основе тандемной амплитудно-фазовой модуляции (ТАФМ) с возможностью их дальнейшего развития на данном типе модулятора.

Принцип работы

Определение угла прихода происходит по очень простому принципу. Система имеет два антенных элемента, с расстояние друг от друга, которое равно половине длины принимаемой волны. Схема с работой показана на рис. 1.

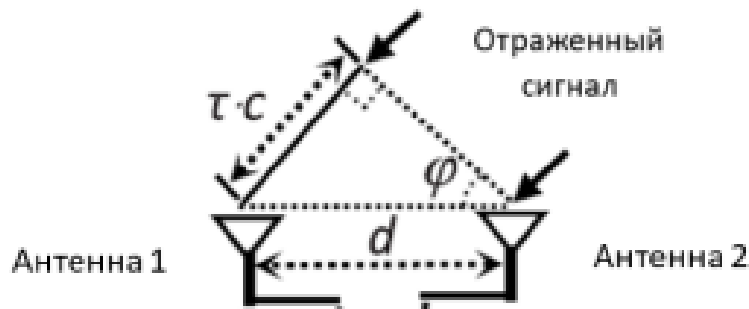


Рис. 1. Ситуационное положение элементов фазированной антенной решетки (ФАР) и фронта падающей волны микроволнового сигнала, отраженного от объекта [1]

Сигнал приходит под углом, а значит, до второй антенны он будет идти дольше и меть временную задержку. Благодаря задержке определяется угол прихода. Формула (1) отражает описанную выше зависимость.

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{c\tau}{d}\right), \quad (1)$$

где φ – угол прихода;
 c – скорость распространения сигнала;
 τ – временная задержка сигнала;
 d – расстояние между элементами антенны.

Предложенный в данной работе метод содержит электрооптические модуляторы. Они выступают в роли двух принимающих антенн. Пришедшие сигналы можно описать в виде уравнения (2)

$$\begin{aligned} E_{R1} &= V_R \cos(\omega_R t) \\ E_{R2} &= V_R \cos(\omega_R t + \varphi), \end{aligned} \quad (2)$$

где V_R и ω_R – амплитуда и угловая частота принимаемых сигналов соответственно;
 φ – разность фаз между принимаемыми сигналами.

В этих блоках осуществляется тандемная амплитудно-фазовая модуляция. Оптический сигнал модулируется отраженным от объекта сигналом в амплитудном модуляторе, а далее происходит фазовая манипуляция в соответствующем фазовом модуляторе. Данная обработка позволяет получить на выходе две боковые составляющие с подавленной несущей. Выражение (3) показывает суммарное электрическое поле на выходе первых двух блоков ТАФМ.

$$E_{out\ 1,2} = \frac{\alpha_i E_{in}}{2\sqrt{2}} e^{j2\pi f_s t} [J_1(m, \varphi) e^{j\pi f_s t} (1 - e^{j\theta}) + J_1(m, \varphi) e^{-j\pi f_s t} (1 - e^{-j\theta})], \quad (3)$$

где E_{in} – амплитуда электрического поля лазерного излучения, попадающего в ТАФМ;

α_i – потери, вносимые ТАФМ;

$J_1(m, \varphi)$ – функция Бесселя первого порядка первого рода;

m и φ – параметры амплитудного и фазового преобразования в ТАФМ, зависящие от амплитуды отраженного сигнала.

Дополнительно устанавливается блок, в котором генерируется сигнал с линейной частотной модуляцией. Уравнение, описывающее этот сигнал, показано в выражении (4).

$$E_{AWG} = V_A \cos(\pi k t^2) \quad t \in (0, T], \quad (4)$$

где k – частота колебаний линейного частотного сигнала;
 T – период.

Следовательно, диапазон частот линейного частотного сигнала равен $0 - kT$. Далее этот сигнал проходит обработку, чтобы получить на выходе несущую сигнала и одну боковую полосу. Выходное оптическое поле определяется по формуле (5).

$$E_y(t) \propto E_0 e^{j\omega_0 t} \{ J_0(\beta_A) + iJ_1(\beta_A) e^{i(\pi k t^2)} - iJ_{-1}(\beta_A) e^{-i(\pi k t^2)} - \\ - i [J_0(\beta_A) + iJ_1(\beta_A) e^{i(\pi k t^2 + \frac{\pi}{2})} - iJ_{-1}(\beta_A) e^{-i(\pi k t^2 + \frac{\pi}{2})}] \} \propto \\ \propto E_0 e^{j\omega_0 t} [(1-i)J_0(\beta_A) + 2iJ_1(\beta_A) e^{i(\pi k t^2)}]. \quad (5)$$

Объединенный сигнал с блоков ТАФМ объединяется с ЛЧМ-сигналом и далее поступает на фотодетектор. Оптический сигнал, регистрируемый фотодиодом, может быть выражен в виде выражения (6)

$$E_{PD}(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} [E_x(t) + E_y(t)] \propto E_0 e^{j\omega_0 t} * \\ * [2J_0(\beta_e) + (1-i)J_0(\beta_A) + i(1+e^{i\alpha})J_1(\beta_e) e^{i\omega_e t} - \\ - i(1+e^{-i\alpha})J_1(\beta_e) e^{-i\omega_e t} + 2iJ_1(\beta_A) e^{i(\pi k t^2)}]. \quad (6)$$

В конце используется полосовой фильтр для получения целевых сигналов. Центральная частота фильтра устанавливается равной максимальной частоте ЛЧМ-сигнала – кТ. Диапазон измерения частоты принимаемого отраженного сигнала составляет от 1 ГГц до кТ–1 ГГц. Отфильтрованные сигналы записываются в виде выражения (7).

$$i(t) \propto J_1(\beta_A) \cos(\pi k t^2) \sqrt{2 + 2 \cos \varphi} J_1(\beta_e) J_1(\beta_A) \cos(\pi k t^2 + \omega_e t). \quad (7)$$

После того, как сигнал будет детектирован, на осциллограмме можно увидеть выходной сигнал, состоящий из опорных импульсов, которые генерируются смещением ЛЧМ-сигнала и оптической несущей. Они повторяются относительно периода линейно-частотного сигнала и имеют высокое значение по амплитуде. Также выходной сигнал должен включать так называемые информационные импульсы, генерирующиеся путем смещения ЛЧМ-сигнала с информационными составляющими отраженного сигнала. Их амплитуда много меньше опорных импульсов. Время появления информационной составляющей напрямую зависит от частоты, с которой сигнал пришел на антенны. Поэтому чтобы найти какой частоте, а значит и какой цели, соответствует импульс необходимо воспользоваться следующим выражением (8).

$$f_i = f_{BPF} - k t_i, \quad (8)$$

где f_i – частота отраженного зондирующего сигнала;
 f_{BPF} – частота максимального значения частоты ЛЧМ-сигнала;
 t_i – время появления информационного импульса.

В зависимости от фазового смещения сигнала на второй антенне меняется амплитуда информационной составляющей выходного сигнала. Именно амплитуда этого импульса определяет соответствие определенному значению фазового смещения [2]. Далее благодаря зависимости (9) можно определить сам угол прихода отраженного от объекта радиолокационного сигнала.

$$\theta = 2\pi(f_s \tau - k), \quad (9)$$

где θ – значение фазового сдвига;
 f_s – частота сигнала;
 k – целое число.

Имитационное моделирование

Первым элементом схемы стал источник лазерного излучения. Затем через оптический разветвитель сигналы поступают на три блока. Первые два блока являются блоками ТАФМ и каждый из них имитирует антенный элемент. На третьем блоке оптический сигнал модулируется линейным частотно-модулированным сигналом. ЛЧМ сигнал имеет начальную частоту 0 ГГц, а максимальную – 10 ГГц. Сигнал возрастает до максимального значения частоты за 5 мкс и повторяет свой цикл по возрастанию с периодом в 5 мкс. Сигналы со всех блоков объединяются и следуют на фотодетектор,

после которого попадают на полосовой фильтр Бесселя. Далее выходная информация регистрируется осциллографом. Общая собранная схема модели продемонстрирована на рис. 2.

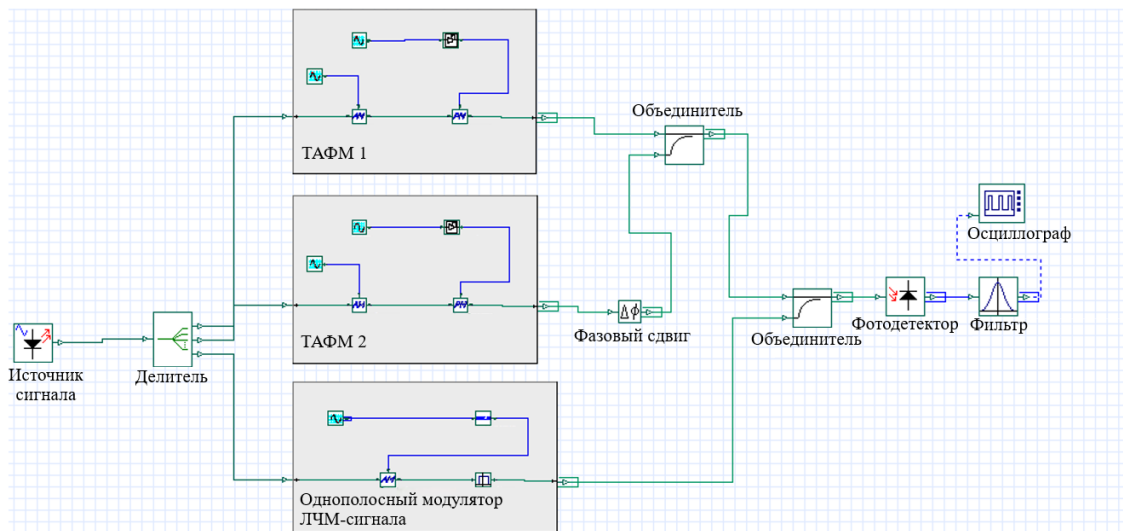


Рис. 2. Схема определения угла прихода на основе ТАФМ с использованием ЛЧМ-сигнала

Моделирование проводилось с имитацией значений фазового сдвига от -120° до 120° . Это позволяет расширить диапазон измерения угла прихода. Сначала была получена выходная осциллограмма на нулевом фазовом сдвиге, продемонстрированной на рис. 3.

На осциллограмме можно увидеть опорные сигналы, расположенные на 5 мкс и 10 мкс, что соответствует периоду ЛЧМ-сигнала. Также можно увидеть информационные сигналы на значении 2,5 мкс от начала каждого периода. Время появления информационного импульса полностью соответствует уравнению (8).

Расчёт частоты информационного пика представлен в выражении (10)

$$f_i = f_{BPF} - kt_i = 10 \text{ МГц} - \frac{(10 \text{ МГц} - 0 \text{ МГц})}{5 \text{ мкс}} * 2,5 \text{ мкс} = 6 \text{ ГГц}. \quad (10)$$

Полученная частота полностью соответствует частоте принятого отраженного сигнала, а значит, что именно этот информационный пик является отражением информации об угле прихода зондирующего объекта.

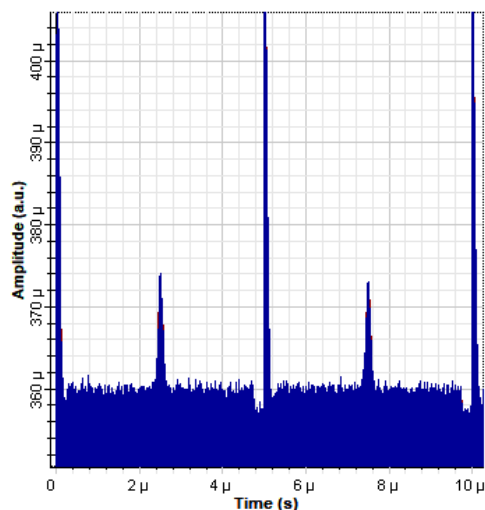


Рис. 3. Выходной сигнал на $\theta = 0^\circ$

Далее снимаются характеристики с шагом в 20° . Получив значения для всех значений фазового сдвига, можно построить характеристику зависимости, изображенную на рис. 4.

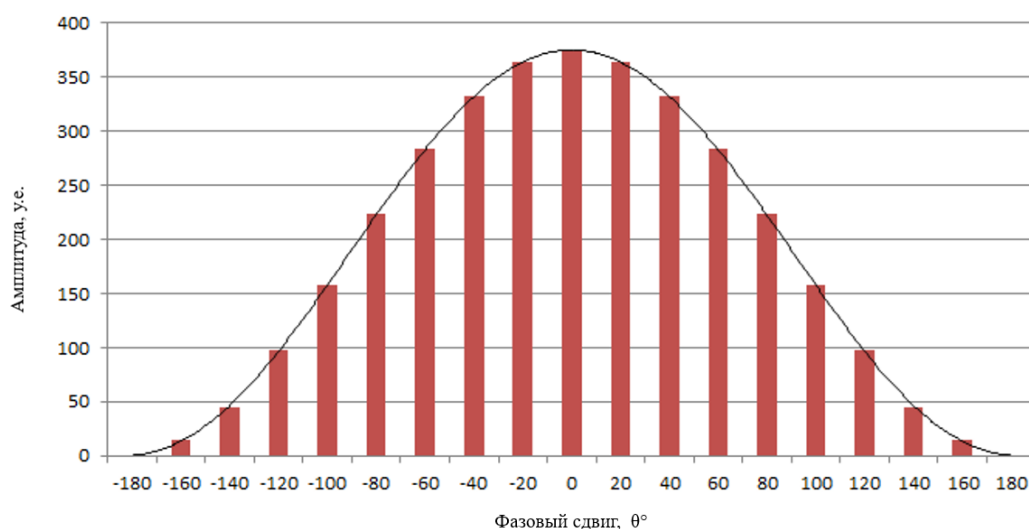


Рис. 4. График зависимости амплитуды от значений фазового сдвига

На этом графике присутствует неопределенность определения значений фазового сдвига по амплитуде, так как, например, для значения 40° и -40° амплитуда одинакова. Чтобы избавиться от неопределенности на ТАФМ2 был поставлен фиксированный сдвиг фазы на 90° . Было проведено повторное моделирование. Получив все значения, строится еще одна характеристика зависимости, продемонстрированная на рис. 5.

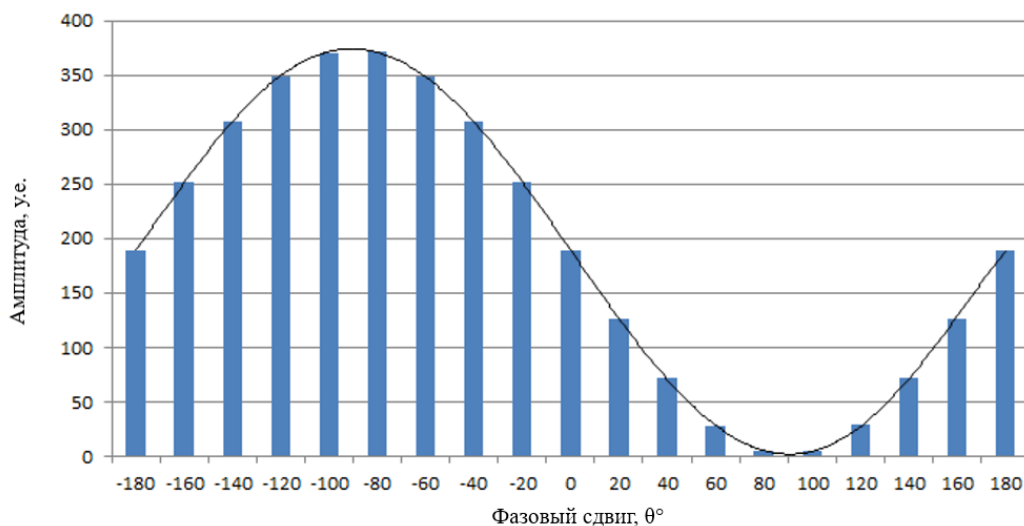


Рис. 5. График зависимости амплитуды от значений фазового сдвига с дополнительным фиксированным значением сдвига на 90°

Проанализировав две характеристики зависимости, можно однозначно определить фазу по отношению амплитуд. Теперь, когда точно известно значение фазового смещения можно рассчитать угол прихода по формулам (1) и (10). Далее строится график зависимости рассчитанного угла прихода от фазового сдвига, проиллюстрированного на рис. 6.

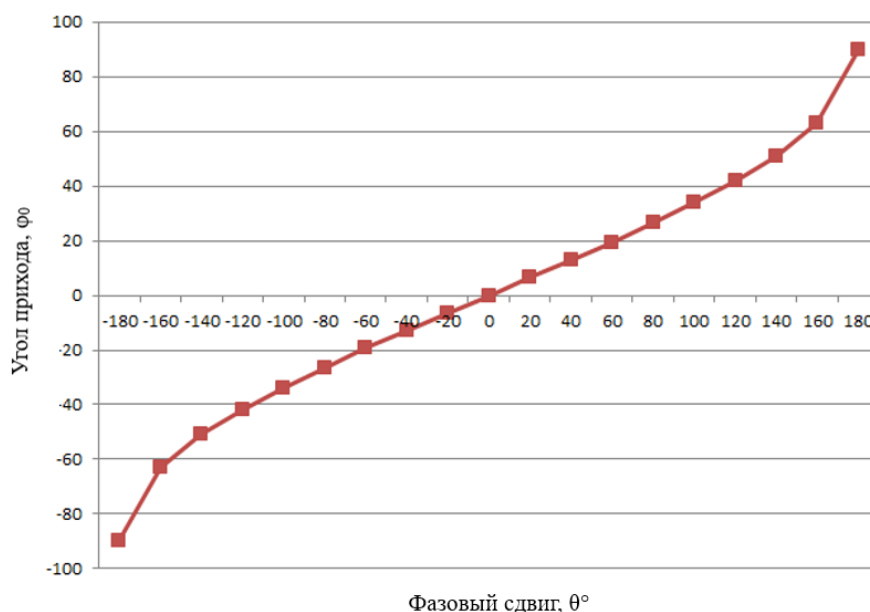


Рис. 6. График зависимости угла прихода от фазового сдвига на частоте зондирующего сигнала в 6 ГГц

Для того чтобы определить углы прихода двух объектов, мы принимали зондирующие частоты на двух частотах – 5 ГГц и 3 ГГц соответственно. Моделирование проходит те же шаги и на выходе мы получаем осциллограмму, показанную на рис. 7.

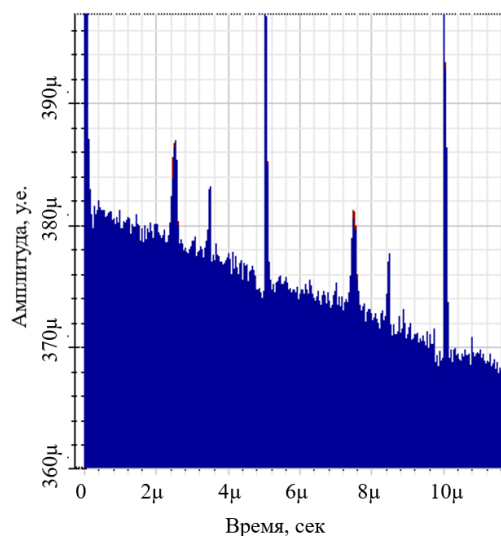


Рис. 7. Выходной сигнал на $\theta_1 = 90^\circ$ (5 ГГц) и $\theta_2 = 120^\circ$ (3 ГГц)

Видно, что информационные импульсы появляется на 2,5 мкс, что соответствует сигналу 5 ГГц и на 3,5 мкс, что по расчётам из уравнения (10), соответствует 3 ГГц.

Таким образом, угол прихода можно определять у нескольких воздушных объектов. Период ЛЧМ-сигнала может вместить в себя еще несколько информационных составляющих, что дает возможность измерять параметры более двух целей.

Выводы

В данной работе были проведены математические расчеты схемы определения угла прихода на основе ТАФМ с дополнительным использованием ЛЧМ-сигнала. Расчеты показали, что есть возможность эффективно определять угол не только одной, но и

множества целей. Далее построена компьютерная модель исследуемого метода. Полученные характеристики показывают, что метод позволяет однозначно определить угол прихода в положительной и отрицательной оси не только одного, но и двух объектов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №23-79-10059.

Литература

1. Морозов О.Г., Морозов Г.А., Ильин Г.И., Нуреев И.И., Сахабутдинов А.Ж., Ростокин И.Н., Иванов А.А., Лустина А.А., Денисенко Е.П., Денисенко П.Е., Андреев В.Д. Радиопотонный метод определения угла прихода отражённого радиолокационного сигнала на основе тандемной амплитудно-фазовой модуляции // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. Йошкар-Ола: 2021. № 1 (49). С. 50-62.
2. Kong, Z (2025), A Photonic Approach for Simultaneous Frequency and AOA Measurement of Multi-Target, Journal Of Lightwave Technology, 2, 572 – 578.
3. Денисенко Е.П., Денисенко П.Е., Ватагина М.А. Радиопотонный метод определения угла прихода с компенсацией интенсивности // V Научный форум телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2021. Самара: 2021. С. 76–77.